

# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....
1.1	Ziel der Bachelorarbeit.....
1.2	Motivation.....
1.3	Grundlagen.....
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....
2.1	Allgemein.....
2.2	Materialien.....
2.2.1	Verzinkte Stahl schweißen.....
2.2.2	Edelstahl AISI304 und Aluminiumlegierung A5052.....
2.3	Anwendung.....
2.4	Verwendete Parameter.....
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b> .....
3.1	Aufgabestellung.....
3.2	Versuchsaufbau.....
3.3	Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe.....
3.4	Laser und –strahleigenschaften.....
3.5	Verwendete Messtechnik.....
3.4	Versuchsparameter.....
<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b> .....
4.1	Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10).....
4.1.1	Ergebnisse für einen Druck von 0,0001 mbar.....
4.1.2	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar.....
4.1.3	Ergebnisse für einen Druck von 10 mbar.....
4.1.4	Ergebnisse für einen Druck von 1000 mbar.....
4.1.5	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 3 mm.....
4.1.6	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 6 mm.....
4.1.7	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 9 mm.....
4.2	Baustahl S355.....
4.2.1	Ergebnisse für einen Druck von 0,0001 mbar.....
4.2.2	Ergebnisse für einen Druck von 0,001 mbar.....
4.2.3	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar.....
4.2.4	Ergebnisse für einen Druck von 0,1mbar bei 0,6m/min.....
4.2.5	Ergebnisse für einen Druck von 10 mbar.....
4.2.6	Ergebnisse für einen Druck von 1000 mbar.....
4.2.7	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 3 mm.....
4.2.8	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 6 mm.....
4.2.9	Ergebnisse für eine Defokussierung von - 9 mm.....
4.3	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Kaltarbeitsstahl 1.2842 ( 90MnCrV8).....
4.4	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Unlegierte Vergütungsstahl 1.0503 (C45).....
4.5	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Kaltarbeitswerkzeugstahl 1.2379 (X155CrVMo121).....
4.6	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Einsatzstahl 1.2162 (21MnCr5).....
4.7	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5).....
4.8	Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei unlegierte Baustahl 1.0037/S235.....
<b>5</b>	<b>Auswertung</b> .....
5.1.1	Mikrohärtemessung.....
5.1.2	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX).....
5.2	Parametervergleich.....
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....
<b>7</b>	<b>Ausblick</b> .....
<b>8</b>	<b>Danksagung</b> .....
	Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen.....
	Abbildungsverzeichnis.....
	Tabellenverzeichnis.....
	Literatur.....
	Anlagen.....
	Anlagen, Diagramme.....
	Anlagen, Härtemessung.....
	Anlagen, Bilder.....

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel der Bachelorarbeit

Laserstrahlschweißen unter dem Vakuum ist ein seltenes Verfahren in der Fügetechnik. Die Laserstrahlung wird durch eine Optik auf den Fügebereich fokussiert und erwärmt den Werkstoff auf Schmelztemperatur. Die Besonderheit von Laserschweißen unter dem Vakuum ist, dass es sehr tiefe Schweißnähte mit schneller Schweißgeschwindigkeit und einer sehr guten Nahtqualität erzeugen werden können. Im Vergleich zu dem Elektrostrahlschweißen hat Laserstrahlschweißen keine magnetische Beeinflussung, da der Elektrostrahl bei dem Schweißprozess durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt wird.

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine große Einschweißtiefe zu erreichen und das die Poren und sonstige Schweißnahtfehler nicht mehr auftreten.

Dazu sollte eine Literaturlauswertung durchgeführt werden für die Entscheidung, welche Versuchsparameter interessant werden könnten. Danach sollte ein Versuchsplan aufgestellt werden. Anschließend sollte eine bestehende Anlage konstruktiv verändert bzw. für die neuen Schweißversuche angepasst werden. Hierzu musste eine Werkstückbefestigung konstruiert werden, um Versuchssteile von 10 mm bis 20 mm Dicke spannen zu können. Es sollte eine Vorrichtung konstruiert werden, um einen Kupferspiegel einsetzen zu können. In Versuchen sollte geklärt werden, wie der Schweißprozess abläuft und welche physikalischen Parameter ihn entscheidend beeinflussen. Mit Querschliffen sollte die Einschweißtiefe der einzelnen Schweißnähte zu ermittelt werden. Wo notwendig sollten Mikrohärtemessungen gemacht werden. Abschließend sollten die gewonnenen Erkenntnisse zum Laserstrahlschweißen unter dem Vakuum ausgewertet und mit dem bisherigen Laserstrahlschweißen unter Vakuum verglichen werden.

Als Proben dienten Körper mit den Abmaßen von ca. 60 mm Länge, 40 mm Breite und 20 mm Dicke aus acht Werkstoffen: ein nichtrostender austenitischer Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10), der Baustahl S355 und der unlegierte Baustahl 1.0037 (S235), die Kaltarbeitswerkzeugstähle 1.2842 (90MnCrV8) und 1.2379 (X155CrVMo121), ein unlegierter Vergütungsstahl 1.0503 (C45) sowie die Einsatzstähle 1.7131 (16MnCr5) und 1.2162 (21MnCr5).

## 1.2 Motivation

Das Hauptziel der Untersuchungen war eine große Einschweißtiefe zu erreichen. Die in Vorversuchen dazu im Praktikum gewonnenen Ergebnisse entsprachen zunächst nicht den Erwartungen. Zum Beispiel entstand beim Versuch mit 2 kW Laserstrahlleistung ein starker Humping-Effekt. In Abbildung 1 ist am oberen Rand der Schliffproben ist diese Erscheinung zu sehen. Es wurde zusätzlich ein Längsschliff gemacht. Bei der mikroskopischen Untersuchung wurden bei dem nichtrostenden austenitischen Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10) viele Schweißnahtfehler entdeckt. Auf den Bildern sind viele Poren zu sehen.



Abbildung 1: Längsschliff 2kW

Vom Versuch mit 3 kW Laserleistung wurden von der Schweißnaht Querschliffe gemacht, die jeweils in Schritten von 0,1 - 0,2 mm von der Oberfläche abgetragen wurden (Abb. 2). Dies wurde gemacht um zu sehen, ob diese Porenbildungen in der Schweißnaht periodisch auftreten.



Abbildung 2 - 15mm  
Blechdicke



Abbildung 3 - 14,9mm  
Blechdicke

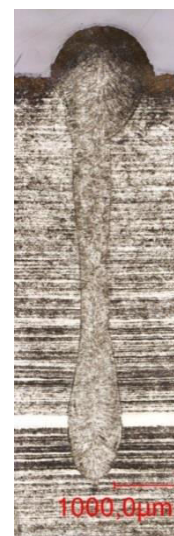


Abbildung 4 - 14,7mm  
Blechdicke



Abbildung 5 – 14,6mm  
Blechdicke



Abbildung 6 – 14,4mm  
Blechdicke



Abbildung 7 – 14,25mm  
Blechdicke

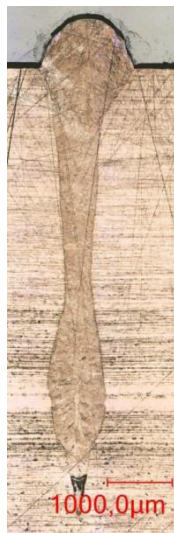


Abbildung 8 –  
14,1mm Blechdicke

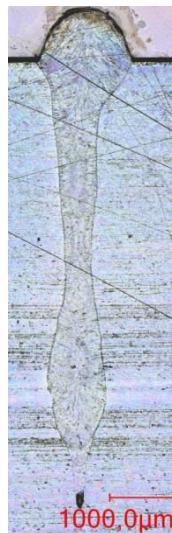


Abbildung 9 – 14mm  
Blechdicke



Abbildung 10 –  
13,8mm Blechdicke

Es wurde festgestellt, dass die Porenbildung bei dem Versuch mit 3 kW Laserleistung periodisch auftritt. Deshalb war die erste Versuchsaufgabe zu erreichen, dass Poren und sonstige Schweißnahtfehler nicht mehr auftreten.



## 1.3 Grundlagen

Prinzipiell kann das Laserstrahlschweißen in Wärmeleitungsschweißen und in Tiefschweißen unterteilt werden. Beide Schweißprozesse unterscheiden sich nach Intensität, Art der absorbierten Laserstrahlung und damit in der entstehenden Nahtgeometrie.

**Wärmeleitungsschweißen** zeichnet sich durch geringere Intensitäten aus. Der auftreffende Laserstrahl wird vom Werkstoff zum Teil absorbiert und zum Teil reflektiert. Die absorbierte Energie wird in Wärme umgewandelt und durch Wärmeleitung in den Werkstoff transportiert. Die maximale Einschweißtiefe liegt normalerweise in der Größenordnung der halben Nahtbreite. Die maximale Schmelzbreite und Schmelztiefe ist dann erreicht, wenn die Oberflächentemperatur der Quelle aufgrund der Wärmeleitungsverluste nicht weiter ansteigt. Mit dem Wärmeleitprozess werden glatte, abgerundete Schweißnähte erzeugt, die nicht mehr nachbearbeitet werden muss. Wärmeleitungsschweißen wird angewendet, um dünnwandige Teile zu verbinden, zum Beispiel für Ecknähte an Sichtkanten von Gehäusen. Weitere Anwendungen finden sich in der Elektronik.

Beim **Tiefschweißen** wird durch hohe Intensität des Laserstrahls der Werkstoff so weit aufgeschmolzen, dass die Verdampfungstemperatur überschritten wird. Es wird eine kritische Intensität erreicht. Der Werkstoff wird an der Oberfläche verdampft und es entsteht ein Dampfkanaal sowie ein Laserplasma. Der Laserstrahl wird nicht mehr reflektiert und kann seine vollständige Energie in das Werkstück einbringen, um tiefere Schweißnähte zu erzeugen. Die Dampfkapillare, auch Keyhole genannt (englisch für Schlüsselloch) ist von Metallschmelze umgeben. Wenn sich der Laserstrahl über die Fugestelle bewegt, bewegt sich die Dampfkapillare mit ihm durch das Werkstück. Die Metallschmelze umfließt die Dampfkapillare und erstarrt an der Rückseite. Auf diese Weise bildet sich eine schmale, tiefe Schweißnaht mit gleichmäßigem Gefüge. Die Nahttiefe ist bis zu 10-mal größer als die Nahtbreite und kann bis zu 25 mm betragen. Tiefschweißen wird angewendet in der Blechbearbeitung, dem Karosserie-, Motoren- und Aggregatbau [13].

Der Laserstrahlschweißprozess zeigt ein deutliches Schwellverhalten für das Einsetzen des Tiefschweißeffektes. Dies kann damit begründet werden, dass erst ab einer gewissen Intensität Verdampfung auftritt. Dieser Metalldampfdruck ist für den Schweißprozess von entscheidender Bedeutung. Einerseits wird ein Schließen der Kapillare verhindert, andererseits kann sich aufgrund der geringen Ionisierungsenergie der Metallatome im Dampf ein laserinduziertes Plasma ausbilden, das die eintreffende Laserleistung mehr oder weniger stark absorbiert. In Abhängigkeit von den einzelnen Parametern kann sich das Plasma derart stark aufheizen, dass nur noch für einen kleinen Teil der einfallenden Strahlung transparent ist. Dadurch wird das Werkstück durch das Plasma abgeschirmt, es kommt zu einer Verringerung der Verdampfungsrate und damit zu einer Verringerung der abströmenden Metalldampfdichte, was wiederum zu einer Verringerung der Absorption führt und damit auch zu einer Verringerung der abschirmenden Wirkung des Plasmas. Dieser Vorgang ist daher instabil und wiederholt sich zufällig und wird Humping genannt [16].

Durch die Reduktion des Umgebungsdruckes lassen sich beim Laserstrahlschweißen hohe Einschweißiefen erzeugen. Anders als beim Elektronenstrahlschweißen werden jedoch nur Drücke bis zu 1 hPa benötigt, um diesen Effekt ausnutzen zu können [17].

Ein großer Vorteil des Schweißens von Werkstücken mit Laserstrahlung ist im Vergleich zu anderen Schweißverfahren, dass ein geringerer und konzentrierter Energieantrag in das Bauteil erfolgt. Damit entsteht ein geringerer Verzug. Der weitere Vorteil ist der große Arbeitsabstand. Eine Besonderheit des Laserstrahlschweißens ist, dass nahezu alle Nahtgeometrien hergestellt werden können (Stumpfnähte, Überlappnähte oder Kehlnähte). Nachteilig sind die hohen Anlagenkosten.

In der Metallbearbeitung werden derzeit vorrangig drei Laserarten eingesetzt: CO<sub>2</sub>-Laser, Festkörperlaser und Diodenlaser. Der CO<sub>2</sub>-Laser war in der Vergangenheit die wichtigste Strahlquelle für industrielle Blechbearbeitung und hat eine Wellenlänge von 10,6 µm. Der Laser wird ausschließlich über Spiegel übertragen. Die Laserstrahlfokussierung erfolgt meist durch Zinkselenid-Linse oder Kupferhohlspiegel. CO<sub>2</sub>-Laser eignet sich neben der Metallbearbeitung auch zum Schneiden von Holz, Stoff und Plexiglas. Lasersicherheit lässt sich theoretisch relativ einfach durch Plexiglasscheiben sicherstellen. Der Festkörperlaser sind eine weitverwendete Laserart. Die Laserstrahlung dieser Laser hat eine Wellenlänge von 1,064 µm und eine höhere Absorption bei Metallen als CO<sub>2</sub>-Laser. Festkörperlaserstrahlung kann aufgrund der Wellenlänge über Glasfasern übertragen werden. Die Lasersicherheit ist hier problematischer als bei CO<sub>2</sub>-Lasern, da die Strahlung sowohl durch einfaches Glas geht, als auch durch den Glaskörper und Linse ins Auge gehen kann. Hier ist die Verwendung von geeignetem Augenschutz, wie z.B. Laserschutzbrillen, besonders wichtig [15].

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Allgemein

Erste Versuche, die Wirkung des CO<sub>2</sub>-Laserstahls unter Vakuum zu nutzen, wurden bereits in den 1980er durchgeführt. Im 2009 wurde eine Entwicklung gestartet, um einen Festkörper – Laserstrahlquelle für das Laserstrahlschweißen im Vakuum zu nutzen. Diese Strahlquelle zeigt hervorragende Steigerung der schweißbaren Blechdicken bei Stahlwerkstoffen mit Wandstärken bis zu 70 mm. Ein System zum Laserstrahlschweißen unter Vakuum ist der Einsatz an einer Vakuum-Taktkammer-Schweißanlage und stellt die erste industrienähe Umsetzung der Technologie weltweit dar [1].

Folgende Forschungseinrichtungen beschäftigen sich wissenschaftlich mit dem Laserstrahlschweißen unter Vakuum:

- ❖ RWTH Aachen – Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik
- ❖ American Welding Society – Welding Journal
- ❖ Joining and Welding Research Institute Osaka, Japan

### 2.2 Materialien

#### 2.2.1 Verzinkte Stahl schweißen

Verzinkte Stähle kommen immer öfter in der Automobilindustrie zum Einsatz. Sie werden aufgrund ihrer ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit und der mechanischen Langzeitsbilität benutzt. Zink bietet bis zu 10 Jahre Korrosionsschutz, wie in einer Veröffentlichung im Welding Journal der American Welding Society dargestellt [10]. Es wird ausgesagt, dass es immer noch Probleme gibt, um verzinkte Stähle spaltfrei in einen Überlappungsstoß zu schweißen. Problematisch ist es, wenn der Zinkdampf nicht entlüftet wird, da dann Spritzer aus der Schweißnaht ausgetrieben werden und Porosität entstehen wird. Es wurde ein Verfahren vorgeschlagen, um verzinkte Stähle in einem spaltfreien Überlappungsstoß zu verbinden. Mit Hilfe einer Saugvorrichtung könnte eine Unterdruckzone hergestellt werden. Die Unterdruckzone hat den Zweck den Zinkdampf entlang der Saugvorrichtung führen. Als Ergebnis wird das Schmelzbad stabiler und das Keyhole bleibt offen, damit der Zinkdampf entweichen kann. Mit einem Unterdruck sollen die Schweißnähte frei von Spritzer und Porosität sein. Es wurden viele Bemühungen gemacht, um hochwertige Schweißnähte an verzinktem Stahl zu erzielen. In der ersten Überlegung wurde gedacht einen Abstandhalter einsetzen, um die Entgasung des Zinkdampfes zu ermöglichen, was zu eine qualitativ, hochwertigen Schweißnaht führt. In einer zweite Va-

riante sollte Zink mit Kupfer legiert werden, um den Stahl zu verschweißen. Bei einem dritten Vorschlag sollte mit Hilfe eines Lasers ein Schlitz geschnitten werden, damit der Zinkdampf aus der Schnittstelle der Bleche entweichen kann und dann mit einem zweiten Laser geschweißt werden. Bei einer andere Verfahrensvariante sollte Metallpulver mit der Zinklegierung in Schmelzbad eingefügt werden, damit Spritzer und Porosität reduziert werden. Es wurde ein CO<sub>2</sub>-Laser-Mikroplasma-Lichtbogenhybridschweißen entwickelt, um verzinkte Stähle zu schweißen. Dazu kommen aber hohe Kosten für die Realisierung dieses Verfahrens. Das CO<sub>2</sub>-Laser-Mikroplasma-Lichtbogen kommt in der Automobilindustrie zum Einsatz [5]. Um die Kosten und die Zykluszeit beim Schweißen zu verringern, wird ein einfaches flexibles Verfahren mit einem Strahl spaltfrei an einer Überlappung eingesetzt.

Der unter hohem Druck stehende Zinkdampf ist die Ursache von Spritzern und Porosität. Die Instabilität des Schmelzbades zeigt sich in Form von Wellen. Ein stabiles Schmelzbad hat eine relativ flache Oberfläche zur Folge mit einer Kreisform des Keyholes. Das Entweichen des Zinkdampfs durch das Keyhole bewirkt, dass die Metallschmelze hinter dem Keyhole wieder entgegengesetzt zur Schweißrichtung geschoben wird. Als Folge würden Vertiefungen und Aufwürfe entstehen. Um verzinkte Stähle spaltfrei im Überlapp zu schweißen, wurde vorgeschlagen Vakuum zu verwenden. Das Resultat zeigt, dass weder Spritzer noch Porosität bei vollständiger Durchdringung vorhanden ist. Das Hauptursache dafür ist, dass mit dem Vakuum ein stabiles und offenes Keyhole erzeugt werden kann, was wiederum einen stabilen Kanal für das entweichen von Zinkdampf bereitstellt. Bei herkömmlichen Laserstrahlverfahren von verzinkten Stählen ist eine Scherkraft immer vorhanden. Mit dem Vakuum Verfahren führt das führende Vakuumsystem des Lasers induziertes Plasma zu der Schweißrichtung, der eine externe Kraft bzw. eine Bremskraft liefert um ein Gegengewicht die Scherkraft, die auf Schmelzbad Oberfläche von Zinkdampf ergibt. Wenn ein Vakuum verwendet wird, dann wird eine Unterdruckzone direkt auf der Oberseite des Schmelzbads erzeugt. Es wurde gezeigt, dass die Größe und das Form des laserinduzierten Plasmas sehr stabil ist, wenn ein Vakuumsystem angewendet wird. Die Stabilität erleichtert die gleichförmige Einkopplung der Laserstrahlung in die zu verschweißten Materialien. Es wurde gezeigt, dass die Schweißnaht an verschiedenen Stellen die gleiche Einschweißtiefe hat. Die verbesserte Stabilität kann durch Vakuum erreicht werden. Frühere Studien haben gezeigt, dass je höher die Temperatur und die Elektronendichte ist, desto höher der Absorptionskoeffizient und der Brechungsindex des laserinduzierten Plasmas [6][7]. Die Koppeffizienz der Energie des Laserstrahls durch Vakuum wird im Vergleich zu den herkömmlichen Versuchen verbessert.

Es wurden auch Zugversuche realisiert. Es wurde 3 Proben untersucht, sowohl mit und ohne Vakuum. Für das Basismaterial wurde eine Zugfestigkeit von 0,78 kN/mm ermittelt. Alle im Vakuum geschweißten Proben brachen in der Wärmeeinflusszone neben dem Grundmaterial. Es wurde eine durchschnittliche Zugfestigkeit bei den Vakuumgeschweißten Proben von 0,77 kN/mm ermittelt. In früheren Studien wurde gezeigt, dass die im Vakuum erreichte Schweißnahtfestigkeit der des Grundmaterials nähert [8] [9]. Nicht im Vakuum geschweißte Proben wiesen eine Zugfestigkeit von 0,51 kN/mm auf. Die Bildung

von Porosität verschlechterte die Zugfestigkeit. Es wurde auch Härtemessung durchgeführt. Der niedrigste Härtewert wurde in der Region in der Nähe des Grundmaterials ermittelt.

### **Schlussfolgerung**

Bei einem mit Vakuum unterstützten Laserstrahlschweißprozess von verzinkten Stählen kann ein hochwertiger, spaltfreier Überlappungsstoß entstehen. Dies wird dadurch erreicht, dass im Vakuum immer ein stabiles und offenes Keyhole erzeugt wird. Damit wird der unter hohem Druck stehende Zinkdampf durch das offene Keyhole austreten. Das laserinduzierte Plasma wird durch das Vakuumsystem entlang der Saugvorrichtung bewegt, und hilft zur Stabilisierung des Schmelzbades [10].

### **2.2.2 Edelstahl AISI304 und Aluminiumlegierung A5052**

In einer Veröffentlichung des Joining and Welding Research Institute Osaka, Japan [14] wurde Laserstrahlschweißen unter Vakuum bei Edelstahl AISI304 und der Aluminiumlegierung A5052 durchgeführt. Es wurde ein Scheibenlaser mit 10 kW, 16 kW und 26 kW im Grobvakuum mit verschiedenen Geschwindigkeiten verwendet. Mit 0,1 kPa und 0,3 m/min Schweißgeschwindigkeit wurde beim Edelstahl mit 16 kW Laserstrahlleistung eine Einschweißtiefe von mehr als 50 mm bzw. mit 26 kW von 70 mm erreicht. Ähnliche Einschweißiefen wurden bei Aluminium erreicht. Es wurde 3 Pumpen verwendet um ein Vakuum herzustellen. Eine Rotationspumpe mit der Pumpgeschwindigkeit von 500 l/min und zwei andere mit 162 l/min. Ab 30 Pa wurde in die Kammer Stickstoff zugeführt. Für die Beleuchtung wurde ein Diodenlaser mit 980 nm verwendet.

#### **Schweißergebnisse für Edelstahl AISI304 bei 16 kW bei 0,3 m/min, 1 m/min und 6 m/min**

Bei der Geschwindigkeit von 6 m/min entsteht eine schmale Schweißnaht. Die Einschweißtiefe nimmt mit der Abnahme des Luftdruckes leicht zu. Bei der Geschwindigkeit von 1 m/min entsteht höhere Einschweißtiefe mit einer Abnahme des Druckes als bei der Geschwindigkeit von 6 m/min. Bei der Geschwindigkeit von 0,3 m/min entstehen die tiefsten Schweißnähte mit Abnahme des Umgebungsdrucks. Bei den Drücken 0,1 kPa und 1 kPa wurde Humping gebildet. Die Einschweißtiefe erhöht sich mit einer Verringerung des Drucks insbesondere bei niedriger Schweißgeschwindigkeit. Beim defokussierte Schweißen mit einem Abstand von – 20 mm wurde die tiefste Schweißnaht erzeugt. Das heißt der Fokus lag 20 mm im Werkstück und damit wurde auch Humping unterdrückt.

#### **Schweißergebnisse Typ A5052 mit 16 kW Scheibenlaser**

Die tiefste Einschweißtiefe von 42 mm wurde mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/min erreicht. Diese Tendenz ist ähnlich wie beim Edelstahl AISI304. Bei kleinerem Druck wurden kleinere Breiten beim Schmelzbad erzeugt.



## **Schweißergebnisse für Edelstahl AISI304 mit 26 kW 0,3 m/min und 0,1 kPa**

Bei einer Defokussierung von +20 mm wurde eine Einschweißtiefe von 46 mm erreicht und bei - 40 mm wurden 73 mm erreicht. Es wurde gezeigt, dass eine Porositätsbildung in einem Bereich der Defokussierung von - 30 mm bis +10 mm einsetzt. Die Einschweißtiefe nimmt mit einem Anstieg der Defokussierung und bei der Verwendung langen Fokussier Optik zu.

### **Schlussfolgerung**

Es wurde das Blindnahtlaserschweißen an korrosionsbeständigem Stahl AISI304 und der Aluminiumlegierung A5052 mit 16 kW oder 26 kW und verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten unter niedrigem Vakuum durchgeführt. Die Eindringtiefe steigt mit Abnahme des Umgebungsdrucks (höheres Vakuum) und niedrigerer Schweißgeschwindigkeit. Beim Edelstahl AISI304 wurde mit dem 16 kW Scheibenlaser eine maximale Einschweißtiefe von mehr als 50 mm und mit 26 kW Laserstrahlleistung 70 mm bei 0,3 m/min und 0,1 kPa unter defokussierten Bedingungen erzeugt. Es wurde beobachtet, dass Spritzen unter höherem Vakuum reduziert werden können. Wenn die Schmelze rückwärts fließt, werden schmale Schweißnähte verursacht und manchmal werden Humping-Perlen beim niedrigeren Drücken gebildet. Die Wechselwirkung zwischen einem Laserstrahl und eine Plasma-wolke wurde kleiner mit der Abnahme des Drucks (höheres Vakuum).

## **2.3 Anwendung**

Strahlschweißverfahren werden in der Automobilindustrie, in der Komponentenfertigung von Kupplungen, Zahnrädern, Wellen und Gelenkwellen verwendet. Es wird auch Elektrostrahlschweißen unter Verwendung von kleinern Vakuumzykluskammern benutzt. Bei der Anwendung von leistungsstarken Festkörperlaser kommt es zu Verschmutzungen der Optik, ausgelöst von Prozessemissionen oder zur erhöhten Neigung von Spritzern. Die Anwendung des Laserstrahlschweißens im Vakuum ermöglicht die Verringerung dieser Nebenwirkungen und gleichzeitig zur Erhöhung der Einschweißtiefe und der Schweißnahtqualität. Nach Verminderung des Umgebungsdruckes wird der Metaldampf reduziert, die Spritzer Neigung verringert und die Einschweißtiefe nimmt zu. Einschweißtiefe kann unter Vakuum bei 0,1 mbar mindestens doppelt so groß sein, als bei einem Umgebungsdruck 1000 mbar. Auch eine Einschweißtiefe mit mehr als 50 mm wurde porenfrei und ohne defekte erreicht. Grundsätzlich kann die Verringerung des Druckes eine deutliche Veränderung der Entwicklung der Schweißgeometrie bewirken. Die Einschweißtiefe könnte erhöht werden und die Poren- und Spritzer- entwicklung reduziert werden. Es wurde eine Nahtbild die ähnlich dem Elektrostrahlschweißen erzeugt. Die Anwendung von Inertgasen bietet einen besseren Schutz vor Oberflächeoxidation. Im Grobblechbereich könnte mit einer Laserleistung von bis zu 16 kW die Eindringtiefe von mehr als 70 mm und Verbundschweißungen mit mehr als 50 mm bei unlegierten Stähle erreicht werden. [11]. Die Einschweißtiefe von 8 mm ist typisch für serien geschweißte Automobilgetriebeteile. Es wurde gezeigt, das auch mit einer Schweißgeschwindigkeit von mehr als 40 mm/s ein

deutlicher Anstieg der Einschweißtiefe im Vergleich zu Schweißungen bei Umgebungsdruck entstehen könnte.

Es entstehen Schweißnähte, die frei von Poren sind und zeigen eine Geometrie, die ähnlich wie beim Elektrostrahlschweißen sind. Bei einem Arbeitsdruck von 0,1 mbar ist, mit geringer Geschwindigkeit und einer Laserleistung von 3 kW eine Einschweißtiefe von mehr als 10 mm möglich. Die Tests wurden in der Schweißposition PA ausgeführt. Viele Anwendungen in der Automobilindustrie zur Herstellung von Getriebeteilen erfordern aber eine Schweißposition PC. Demzufolge wurde die Ausrüstung von Schweißposition PA in PC geändert und Originalteile von LKW und PKW geschweißt. Erste Tests wurden an Planetenradträgern durchgeführt. Die maximale Eindringtiefe eines Bolzens in der Mitte ist 25 mm. Eine Durchführung der Schweißung in Atmosphäre war nicht möglich. Trotz der Beschränkung auf 8 kW Laserleistung wurden gute Schweißergebnisse erreicht. Der Oberfläche der Schweißnaht und der Wurzel sind frei von Poren. Es sind Spritzer vorhanden, die aber leicht durch bürsten oder durch Druckluft entfernenbar waren. Die vorgestellten Ergebnisse wurden in Vorversuchen erreicht. Durch Optimierung des Schweißvorbereitung und der Spannvorrichtung sind deutlich bessere Schweißergebnisse zu erwarten. Es wurde noch ein zweites Teil geschweißt, eine Zahnradhohlwelle. Dieses Teil besteht aus einer Hohlwelle und einem Kegelrad. Beide Teile sind mit einem Presssitz vorfixiert und wurden radial verschweißt. Die Materialien sind Vergütungsstähle. Die Teile wurden mit einer Laserleistung von 4 kW in der Atmosphäre verschweißt. Insbesondere in den überlappenden Bereichen treten jedoch Schweißfehler, wie Poren, auf. Mit einer Laserstrahlleistung von 2,8 kW und einem Druck von  $10^1$  mbar entstand eine porenfreie Überlappenschweißnaht mit einer Einschweißtiefe von 7 mm bis 8 mm. Bei der Härtemessung wurde noch akzeptable Härtwerte im Bereich Wärmeeinflusszone und des Schweißgutes ermittelt.

## **Zusammenfassung**

Diese Verfahren erlaubt die erhebliche Zunahme der Einschweißtiefe bei Planetenträgerteilen. Diese Teile erfordern ein Vakuum, um fehlerfrei in einer Naht geschweißt zu werden. Die Verringerung von Spritzern spricht in diesem Fall für die Anwendung dieser Methode. Die Reduzierung von Spritzern ist von großem Vorteil für die Prozess. Es ist zu erwarten das Laserstrahlschweißen unter Vakuum in der Produktion von Komponenten der Fahrzeugindustrie eingeführt wird. [12]

## 2.4 Verwendete Parameter

Die Bearbeitungsparameter und die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst.

Einrichtung	Material	Leistung	Fokusbereich	Brennweite	Lasermode	Wellenlänge	Lasertyp
THE WELDING JOURNAL, JULY 2013	Verzinkte Dualphasenstahl DP590	4 kW	0,3 mm	-	Multimode	-	-
RWTH Aachen ISF – Institut für Schweiß- und Fügetechnik	S355	1 kW - 5 kW	-	-	-	1030 nm	
Joining and Welding Research Institute Osaka, Japan	Edelstahl AISI304,	10 kW,	-	1000 mm	-	1030 nm	Scheibenlaser
	Aluminiumlegierung	16 kW,					
	A5052	26 kW					

Ergebnisse	Schweißgeschwindigkeit	Druck	Einschweißtiefe	Max. ET
RWTH Aachen ISF – Institut für Schweiß- und Fügetechnik	0,6 m/min – 2,4 m/min	20 <sup>-1</sup> mbar	1,5 mm-10,5 mm	10,5 mm bei 3 kW und 0,6 m/min
Joining and Welding Research Institute Osaka, Japan	0,3 m/min – 6 m/min	0,1 kPa – 1 kPa	46 mm-73 mm	70 mm bei 26 kW und 0,3 m/min

Tabelle 1: Die Bearbeitungsparameter

## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Aufgabestellung

Es sollten Schweißversuche unter dem Vakuum realisiert werden. Das gewünschte Ziel war eine maximale Einschweißtiefe zu erreichen ohne Schweißnahtfehler. Um die Einschweißtiefe zu ermitteln sollten die Proben getrennt, eingebettet und präpariert werden. Die Einschweißtiefen wurden mit dem Keyence Konfokal-3D-Laserscanning-Mikroskop erfasst und in den Diagrammen dargestellt. Von ausgewählten Proben sollten außerdem noch Mikrohärtemessungen realisiert werden.

### 3.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurde die gleiche Anlage verwendet, wie sie in den Vorversuchen im Praktikum benutzt wurde. Der Laserstrahl kommt von oben und wird durch einen ersten Spiegel umgelenkt. Der umgelenkte Laserstrahl bewegt sich horizontal auf einen zweiten Spiegel und wird um  $90^\circ$  nach unten umgelenkt. Der Laserstrahl mit einer Linse mit einer Brennweite von 200 mm fokussiert und geht durch das Deckelfenster in die Vakuumkammer. In der Vakuumkammer wurde eine Auflage konstruiert, auf der sind ein Spiegel und die Verfahrachse für die Probe montiert war. Der Laserstrahl wird in der Vakuumkammer vom Spiegel horizontal umgelenkt und trifft auf das Werkstück. Die Probe wird unter in der Schweißposition PC bzw. Querposition geschweißt.

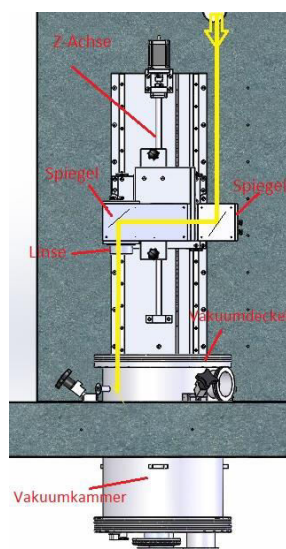


Abbildung 11: Strahlengang bis zur Vakuumkammer



Abbildung 12: Vakuumkammer - Blick in den Innenraum

### 3.3 Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe

Als Werkstoffe wurden ein nichtrostender austenitischer Stahl 1.4301 (AISI304), ein Baustahl S355, ein Kaltarbeitswerkzeugstahl 1.2842, ein unlegierter Vergütungsstahl 1.0503, ein Kaltarbeitswerkzeugstahl 1.2379, ein Einsatzstahl 1.2162, ein Einsatzstahl 1.7131 und der unlegierte Baustahl 1.0037 - S235 verwendet. Die Probekörper hätten die Abmaße von 60 mm x 40 mm mit Dicke von 20 mm.

Es folgt ein kurze Überblick über chemische Zusammensetzung von verwendeten Werkstoffen. Dieser Überblick wurde in die Tabellen zusammengefasst.

Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10)	
C [%]	≤ 0,07
Si [%]	≤ 1
Mn [%]	≤ 2
P [%]	≤ 0,045
S [%]	≤ 0,015
N [%]	≤ 0,1
Cr [%]	17,5 bis 19,5
Ni [%]	8 bis 10,5
Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von Nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10	

Unlegierte Baustahl 1.0045 / S355	
C [%]	≤ 0,24
Si [%]	≤ 0,55
Mn [%]	≤ 1,60
P [%]	≤ 0,035
S [%]	≤ 0,035
N [%]	≤ 0,012
Cu [%]	≤ 0,55 <sup>3)</sup>
CE <sup>3)</sup> [%]	≤ 0,45
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Unlegierte Baustahl S355	

Unlegierte Vergütungsstahl 1.0503 (C45)	
C [%]	0,42 - 0,50
Si [%]	<0,40
Mn [%]	0,50 - 0,80
P [%]	<0,045
S [%]	<0,045
Cr [%]	<0,40
Mo [%]	<0,10
Ni [%]	0,40
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von unlegierter Vergütungsstahl C45	

Kaltarbeitswerkzeugstahl 1.2379 (X155CrVMo121)	
C [%]	1,55
Si [%]	0,3
Mn [%]	0,3
Cr [%]	12
Mo [%]	0,8
V [%]	0,9
W [%]	0,18
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von Kaltarbeitswerkzeugstahl X155CrVMo121	

Einsatzstahl 1.2162 (21MnCr5)	
C [%]	0,21
Si [%]	0,25
Mn [%]	1,2
Cr [%]	1,2
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung von Einsatzstahl 21MnCr5	

Kaltarbeitsstahl 1.2842 ( 90MnCrV8)	
C [%]	0,9
Si [%]	0,2
Mn [%]	2
Cr [%]	0,4
V [%]	0,1
Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung von 90MnCrV8	

Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5)	
C [%]	0,14 – 0,19
Si max. [%]	0,40
Mn [%]	1,00 – 1,30
Cr [%]	0,80 – 1,10
S max. [%]	0,035 / 0,020 – 0,040
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung von Einsatzstahl 16MnCr5	

Unlegierter Baustahl 1.0038 / S235	
C [%]	max. 0,17
Si [%]	max. 0,30
Mn [%]	max. 1,40
P [%]	max. 0,045
S [%]	max. 0,045
N [%]	max. 0,009
Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung von S235	

3) Max. Kohlenstoffäquivalent CE = C + Mn /6 + (Cr + Mo + V) /5 + (Cu + Ni) /15



Für die beiden nachfolgenden Werkstoffe wurde eine Analyse im Grundmaterial durchgeführt, um tatsächliche chemische Zusammensetzung darzustellen.

Edelstahl 1.4301 (X5CrNi18-10)		Baustahl S355	
C [%]	0,021	C%	0,159
Si [%]	0,59	Si%	0,222
Mn [%]	1,21	Mn%	1,060
P [%]	0,073	P%	0,0191
S [%]	0,03	S%	0,0051
V [%]	0,087	Ni%	0,182
Cr [%]	18,25	Cr%	0,229
Ni [%]	7,98	Mo%	0,039
Mo [%]	0,321	Cu%	0,339
Cu [%]	0,32	Ti%	0,017
Al [%]	0,022	Al%	0,0204
Ti [%]	0,006	V%	0,002
Fe [%]	70,86	W%	0,01
Tatsächliche chemische Zusammensetzung von Nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10		Fe%	97,63
		Tatsächliche chemische Zusammensetzung von Baustahl S355	

Tabelle 10: Nachgemessene chemische Zusammensetzung

### 3.4 Laser und –strahleigenschaften

Zum Einsatz kam ein Yb:YLR Monomode Faserlaser der Firma IPG (Modell YLR3000-SM) mit der maximalen Laserstrahlleistung von 3 kW am Fasersausgang. Die gemessene Beugungsmaßzahl beträgt  $M2 = 1,1 - 1,2$ . Der Laserstrahl ist zufällig polarisiert. Die Wellenlänge liegt zwischen 1070 bis 1080 nm. Die Herstellerangaben zum Laser sind in Tabelle aufgelistet.

Parameter	
Optische Parameter	
Nenn-Ausgangsleistung	3000W
BPP nach der Fütterung Faser	<2.0 mm*mrad
BPP nach der Verarbeitung Faser	<4 mm*mrad
Feeding-Faserkerndurchmesser	50 µm
Transport- Faserkerndurchmesser	100 µm
Elektrische Parameter	
elektrische Anforderungen	360-528V, 3P+PE, 50-60Hz
Typische Leistungsaufnahme	10-12 kW
Standardschnittstellen	Ethernet, Digital I/O, Analog, PROFIBUS**, DeviceNet**
Direktmodulation	0-5
Allgemeine Parameter	
Max. Kühlwasserverbrauch (25 ° C)	1.4 m <sup>3</sup> /h
Kühlwasser Temperaturbereich	20-25°C
Umgebungstemperatur	10-50
Gehäusotyp	IP-54

Tabelle 11: Herstellerangaben zum Lasergerät Modell YLR 3000-SM

### 3.5 Verwendete Messtechnik

Die Präparation und Auswertung der generierten Proben erfolgte mit Hilfe der aufgelisteten Messtechniken:

#### Präparation

- Grob- und Feintrenngerät zur Schliffherstellung
- Einbetten der Proben mit Epofix und Durocit
- Plan- und Feinschleifgerät
- Ätzen nach Beraha 2 und Nital

#### Auswertung der geschliffenen Proben

- Keyence Konfokales 3D Laserscanning-Mikroskop

#### Auswertung der nicht präparierten Proben

- Keyence Digitalmikroskop

#### Härtemessung

- Automatischer Härteprüfer HMV 2000 von Shimadzu

Die Ätzung nach Beraha 2 ist eine Farbätzung. Mit diesem Ätzmittel wurde Edelstahl geätzt. Bei Seigerungen werden legierungsreichere Bereiche heller und legierungsärmere Bereiche dunkler gefärbt. Nach längerer Liegezeit der Probe können sich die Farbwirkungen verstärken. Die Farbätzung sollte unmittelbar nach dem Polieren erfolgen und während der Ätzung ist die Probe leicht zu bewegen. Die Probe ist mit Wasser zu benetzen und dann erst ins Ätzmittel tauchen (Nassätzung). Nach dem Ätzen darf diese nicht abgewischt. Die Stammlösung ist lange Zeit haltbar, das fertig angesetzte Beraha Ätzmittel 1 – 2 Stunden.

Bei dem Baustahl wurde eine Alkoholische Salpetersäure benutzt, oft auch als Nital bezeichnet. Nitallösung ist eines der am häufigsten gebrauchten Lösungen. Hauptanwendungsgebiet ist die Gefügeentwicklung bei Bau- und Werkzeugstählen. Gefügestruktur, Randentkohlung und Seigerungen können damit verdeutlicht werden. Bei längerer Ätzdauer lassen sich teilweise auch höherlegierte martensitische Chromstähle anätzen. Bei langer Ätzdauer findet das Ätzmittel auch Anwendung als Tiefätzmittel [18].

### 3.4 Versuchsparmeter

Die Untersuchungen wurden mit einer im cw-Betrieb arbeitenden Monomode-Faserlaserquelle mit einer Laserleistung von 0,5 kW bis zu 3 kW am Laserausgang und einem Druck von 0,0001 mbar bis 1000 mbar durchgeführt. Es wurde ein Spot-durchmesser von 50  $\mu\text{m}$  eingestellt. Die Versuche wurden mit konstanter Geschwindigkeit von 20 mm/s bzw. 1,2 m/min bei einem Versuch mit 0,6 m/min durchgeführt. Teilweise wurde eine Defokussierung von - 3 mm bis - 9 mm angewendet. Dabei bezieht sich die Defokussierung auf die Fokusslage am Werkstück. In diesem Fall bedeutet es, dass der Fokus 3 bis 9 mm im Werkstück liegt. Bei realen Laserstrahlen mit von 1 abweichender Strahlgüte wird der Strahldurchmesser entsprechend aktuell gültiger ISO-Normen über den Leistungseinschluss (z.B. steht d86 für 86% Leistungseinschluss) berücksichtigt. Zwischen Laser und Bearbeitungsstelle befinden sich jedoch viele optische Komponenten, die einen Teil der Laserstrahlung absorbieren und die Strahlqualität verschlechtern können. Es wurde deswegen zu jeder eingestellten Laserstrahlleistung 14% addiert.

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10)

Proben wurden an drei Stellen getrennt: am Anfang, in der Mitte und am Ende der Schweißnaht. Danach wurden Sie mit Durocit eingebettet. Am Ende wurden alle Proben mit Beraha 2 Ätzlösung geätzt. Bei Proben, wo Humping entstanden ist, wurde ein Abstand zwischen einer Periode an Humping-Perlen gemessen. Der Abstand wurde an drei Stellen gemessen und ein Mittelwert gebildet.

#### 4.1.1 Ergebnisse für einen Druck von 0,0001 mbar



Abbildung 13: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Abbildung 14: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

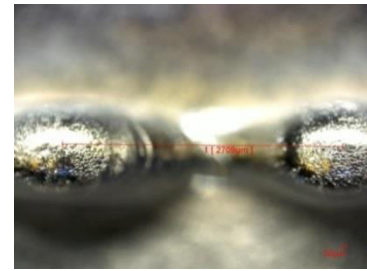
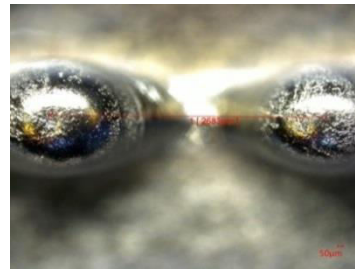
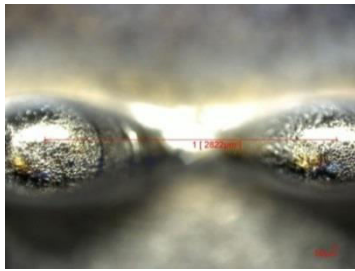


Abbildung 15: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Abbildung 16: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

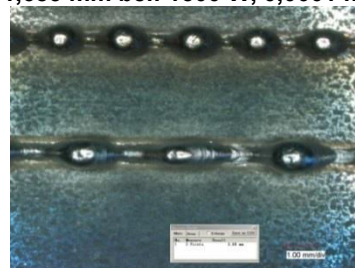
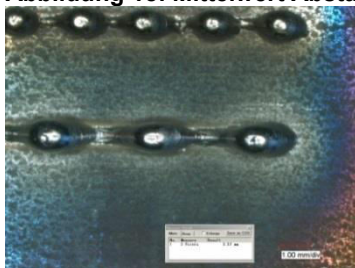




**Abbildung 17: Mittelwert Abstand 2,738 mm bei: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min:**



**Abbildung 18: Mittelwert Abstand 1,683 mm bei: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min:**



**Abbildung 19: Mittelwert Abstand 3,5 mm bei: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



**Querschliff Start, ET 2,964 mm**



**Querschliff Mitte, ET 2,435 mm**

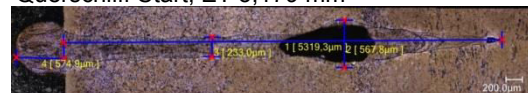


**Querschliff Ende, ET 2,794 mm**

**Abbildung 20: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



**Querschliff Start, ET 5,179 mm**



**Querschliff Mitte, ET 5,319 mm**



**Querschliff Ende, ET 5,583 mm**

**Abbildung 21: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 7,437 mm



Querschliff Mitte, ET 7,885 mm

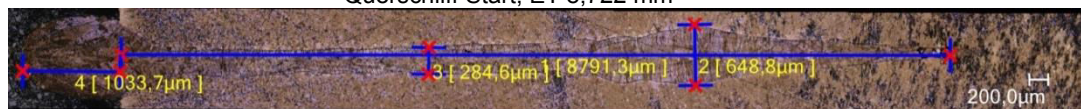


Querschliff Ende, ET 7,126 mm

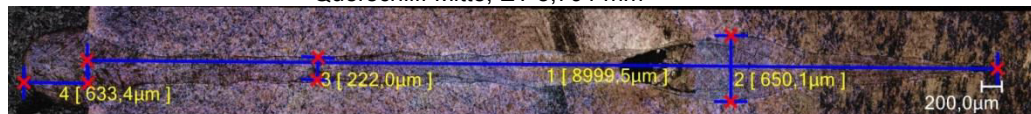
**Abbildung 22: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 8,722 mm



Querschliff Mitte, ET 8,791 mm



Querschliff Ende, ET 8,99 mm

**Abbildung 23: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



#### 4.1.2 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar



Abbildung 24: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

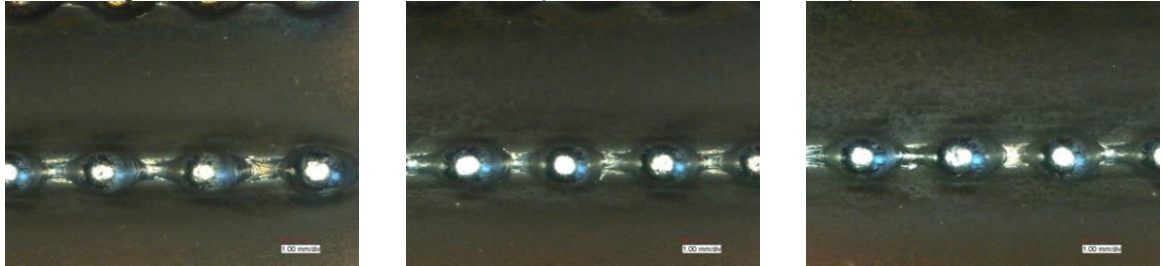


Abbildung 25: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

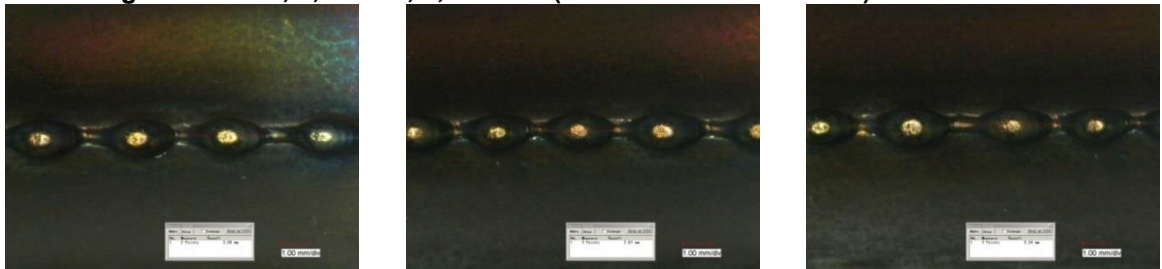


Abbildung 26: Mittelwert Abstand 3,17 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min

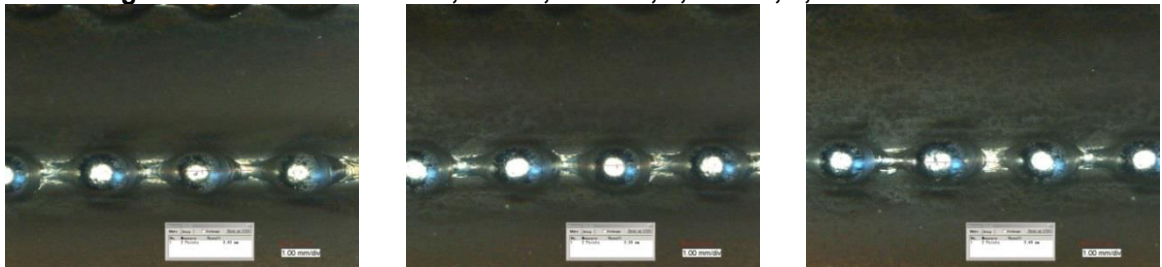
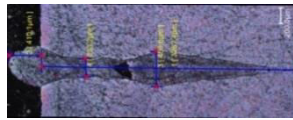
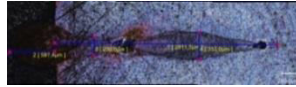


Abbildung 27: Mittelwert Abstand 3,4 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 3,267 mm

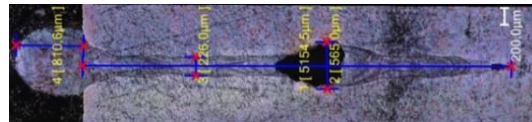


Querschliff Mitte, ET 2,911 mm



Querschliff Ende, ET 2,797 mm

**Abbildung 28: 500 W, 0,01 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 5,154 mm

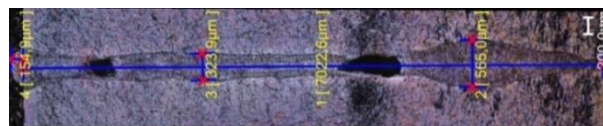


Querschliff Mitte, ET 4,996 mm

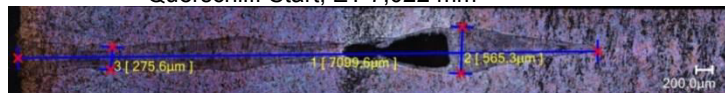


Querschliff Ende, ET 5,097 mm

**Abbildung 29: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 7,022 mm



Querschliff Mitte, ET 7,09 mm



Querschliff Ende, ET 7,188 mm

**Abbildung 30: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Es wurden drei Versuche mit dem Unterdruck von 0,1 mbar durchgeführt. Festgestellt wurde das nur bei der Laserleistung von 500 W ist die Einschweißtiefe größer ist als mit dem Unterdruck von 0,0001 mbar. Bei allen Schweißergebnissen wurden Schweißnahtfehler bzw. Poren ermittelt. Ab der Leistung 1000 W bis 1500 W ist Humping entstanden. Der Mittelwertabstand zwischen zwei Humping Perlen beträgt bei der Leistungen 1000 W 3,17 mm und bei 1500 W 3,4 mm. Der Mittelwertabstand zwischen zwei Humping Perlen ist größer als bei dem Unterdruck von 0,0001 mbar. Die maximale erreichbare Einschweißtiefe beträgt 7,188 mm.



### 4.1.3 Ergebnisse für einen Druck von 10 mbar

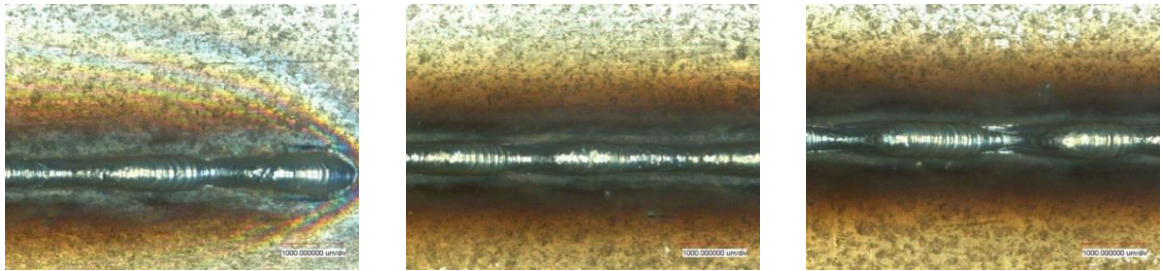


Abbildung 31: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

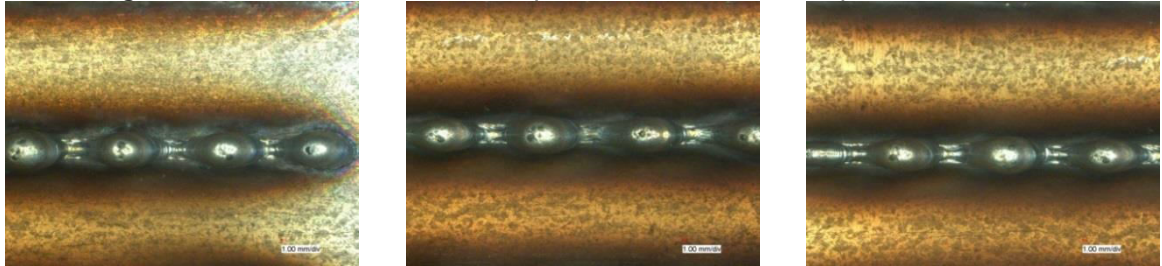


Abbildung 32: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

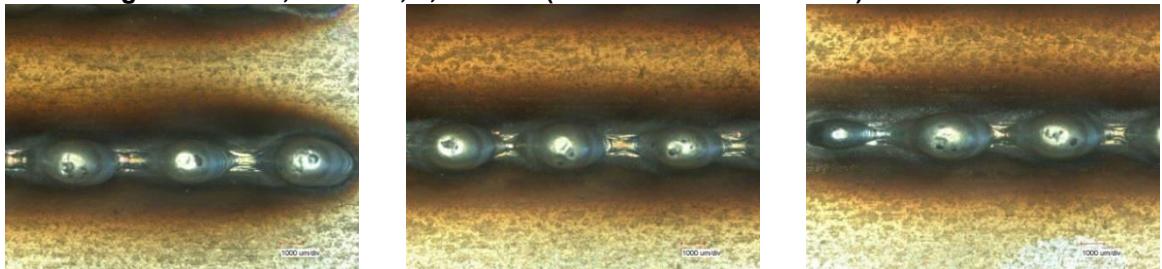


Abbildung 33: 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Abbildung 34: Mittelwert Abstand 4,43 mm, 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min

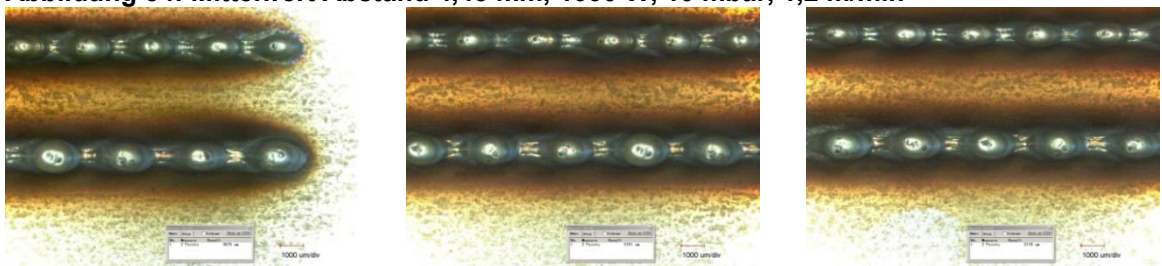
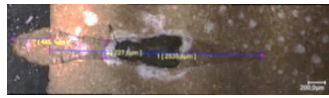
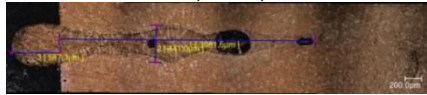


Abbildung 35: Mittelwert Abstand 3,13 mm, 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min





Querschliff Start , ET 2,535 mm

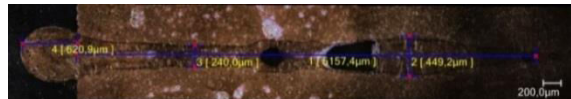


Querschliff Mitte, ET 3,081mm

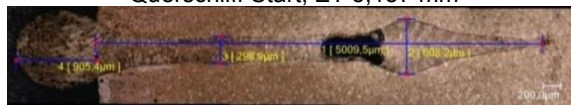


Querschliff Ende, ET 3,363 mm

**Abbildung 36: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 5,157 mm



Querschliff Mitte, ET 5,01 mm

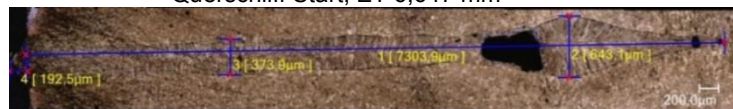


Querschliff Ende, ET 5,26 mm

**Abbildung 37: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 6,647 mm



Querschliff Mitte, ET 7,303 mm

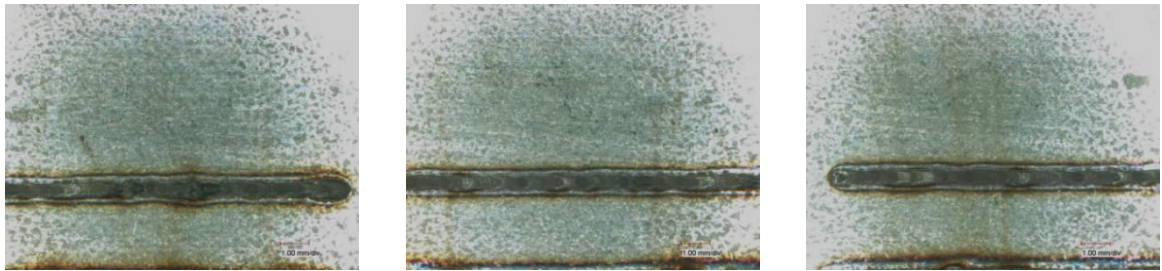


Querschliff Ende, ET 7,445 mm

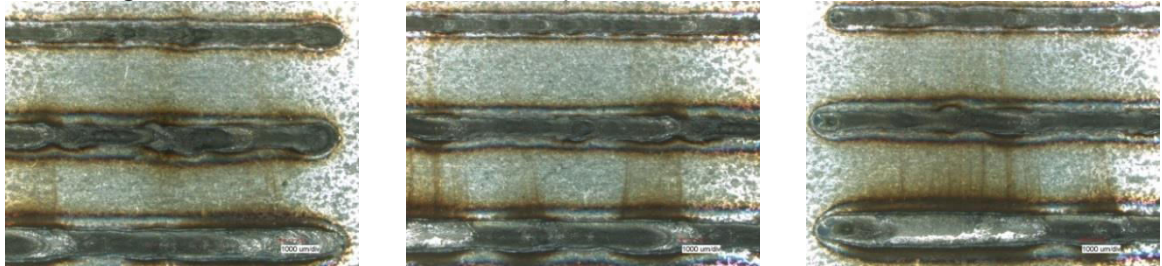
**Abbildung 38: 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min**

Es wurden drei Versuche mit dem Unterdruck von 10 mbar durchgeführt. Hier wurde auch gezeigt, dass mit steigender Laserleistung die Einschweißtiefe ebenfalls steigt. Es wurde festgestellt, dass die maximale Einschweißtiefe größer ist als bei dem Unterdruck 0,1 mbar. Auch hier wurde Schweißnahtfehler bzw. Poren entdeckt. Die Schweißnahtbreite bleibt nicht konstant. Ab der Laserleistung von 1000 W bis 1500 W wurden Humping entstanden. Der Mittelwertabstand zwischen zwei Humping Perlen beträgt bei den Leistungen bei 1000 W 4,43 mm und bei 1500 W 3,13 mm. Die maximale erreichbare Einschweißtiefe beträgt 7,445 mm.

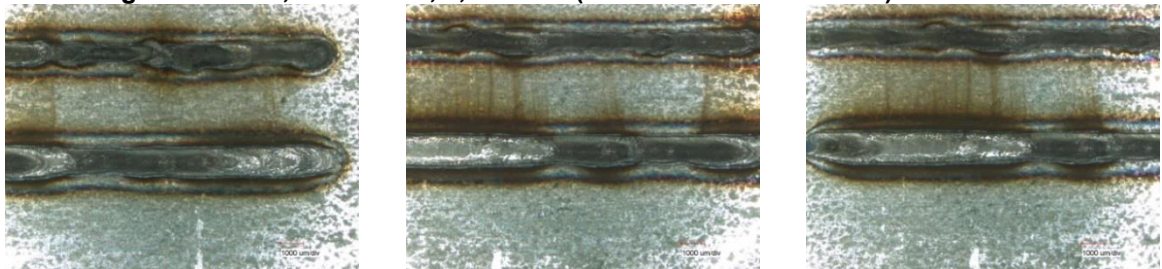
#### 4.1.4 Ergebnisse für einen Druck von 1000 mbar



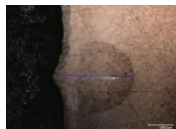
**Abbildung 39: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



**Abbildung 40: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



**Abbildung 41: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



Querschliff Start, ET 0,573 mm

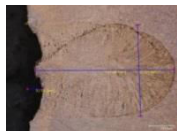


Querschliff Mitte, ET 0,552 mm



Querschliff Ende, ET 0,375 mm

**Abbildung 42: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 1,148 mm

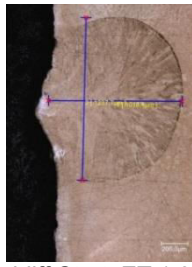


Querschliff Mitte, ET 0,916 mm

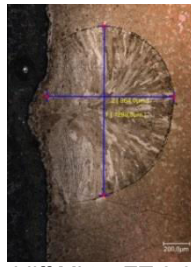


Querschliff Ende, ET 0,664 mm

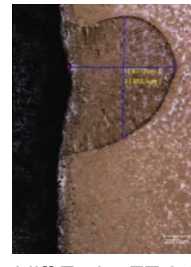
**Abbildung 43: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 1,018 mm



Querschliff Mitte, ET 0,964 mm



Querschliff Ende, ET 0,837 mm

**Abbildung 44: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**

Mit dem Druck von 1000 mbar wurde die kleinste Einschweißtiefe erreicht. Auch hier steigt die Einschweißtiefe mit der Leistung aber nur allmählich an. Die Schweißnahtbreite ist deutlich größer als bei allen andere Versuche mit der kleineren Laserleistung. Mit dem Druck von 1000 mbar wurden viele Spritzer entstanden. Die maximale erreichbare Einschweißtiefe mit dem Druck von 1000 mbar beträgt 1,148 mm.



#### 4.1.5 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 3 mm

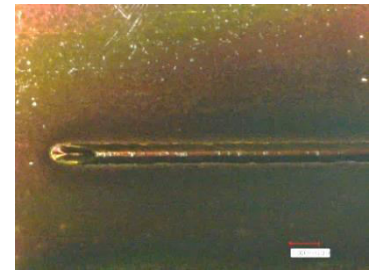
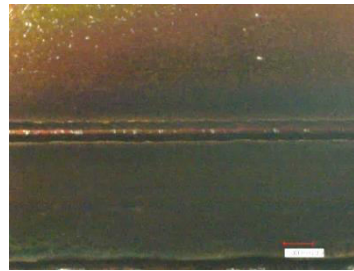
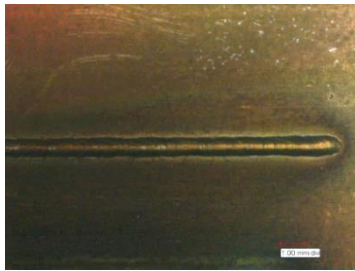


Abbildung 45: 500 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

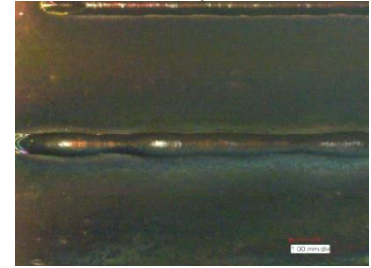
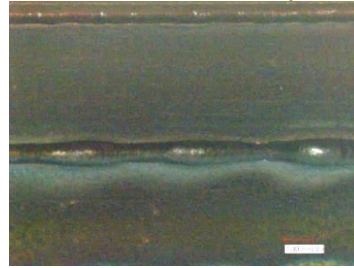
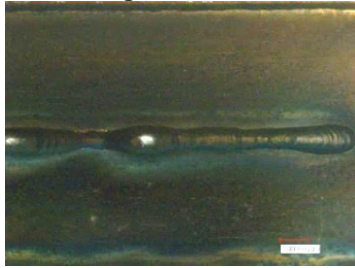


Abbildung 46: 1000 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

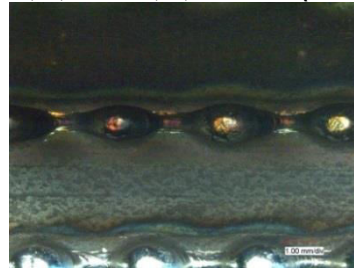


Abbildung 47: 1500 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

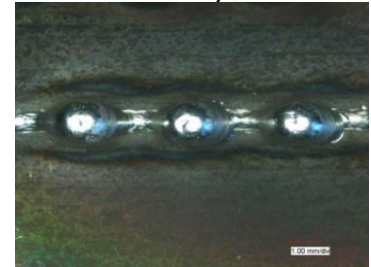
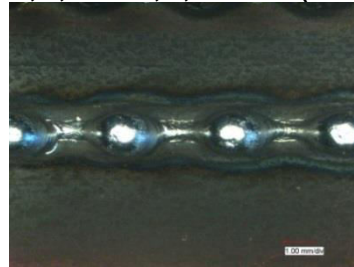


Abbildung 48: 2000 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

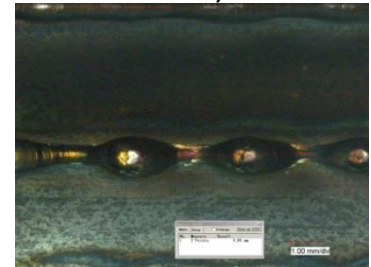
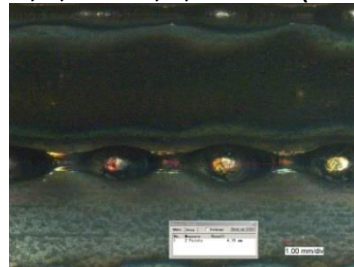
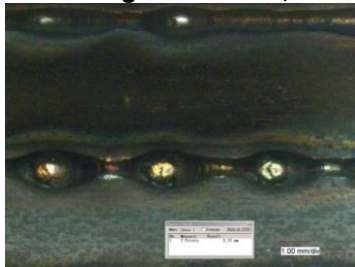
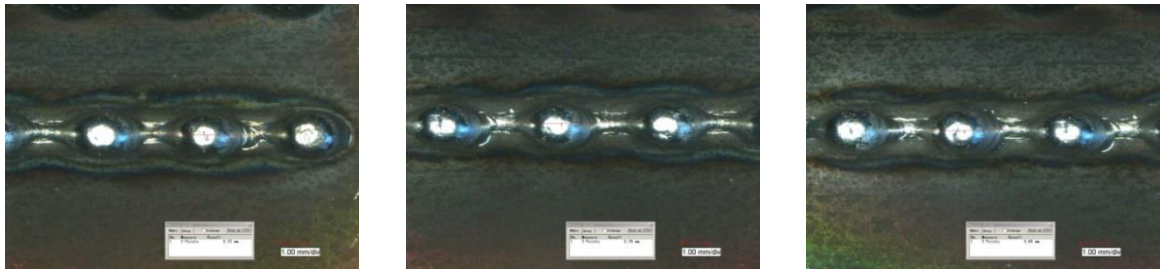


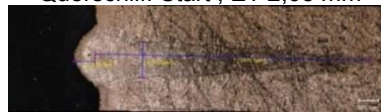
Abbildung 49: Mittelwert Abstand 3,94 mm, Def.-3mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



**Abbildung 50: Mittelwert Abstand 3,73 mm, Def.-3 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start , ET 2,68 mm



Querschliff Mitte, ET 2,806 mm



Querschliff Ende, ET 2,61 mm

**Abbildung 51: Def.-3 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 4,876 mm



Querschliff Mitte, ET 4,743 mm



Querschliff Ende, ET 4,739 mm

**Abbildung 52: Def.-3 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 6,311 mm



Querschliff Mitte, ET 6,727 mm

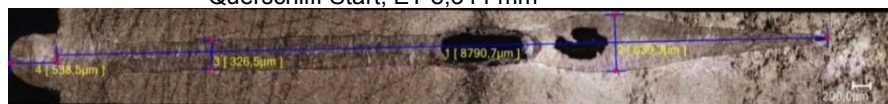


Querschliff Ende, ET 6,836 mm

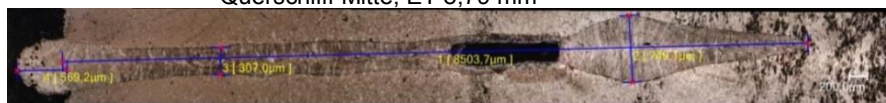
**Abbildung 53: Def.-3 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 8,544 mm



Querschliff Mitte, ET 8,79 mm



Querschliff Ende, ET 8,503 mm

**Abbildung 54: Def.-3 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Es wurde 4 Schweißnähte mit dem Unterdruck 0,1 mbar und einer Defokussierung von - 3 mm erzeugt. Die Versuche wurden auch hier mit der konstanten Schweißgeschwindigkeit von 1,2 m/min durchgeführt. Mit der Defokussierung - 3 mm sinkt auch die Einschweißtiefe im Vergleich zu Defokussierung 0. Auch hier wurde Schweißnahtfehler bzw. Poren entdeckt. Ab der Leistung 1500 W bis 2000 W wurde Humping entstanden. Der Mittelwertabstand zwischen zwei Humping Perlen beträgt bei den Leistungen bei 1500 W 3,94 mm und bei 2000 W 3,73 mm. Der Mittelwertabstand zwischen zwei Humping Perlen wird kleiner mit steigender Laserleistung. Die maximale erreichbare Einschweißtiefe beträgt 8,79 mm.



#### 4.1.6 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 6 mm

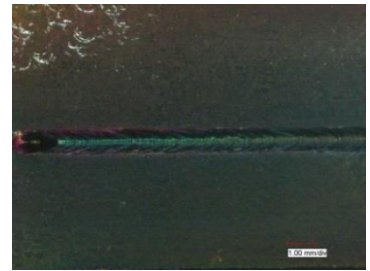
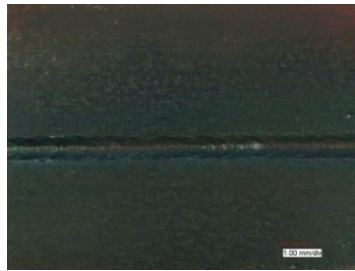
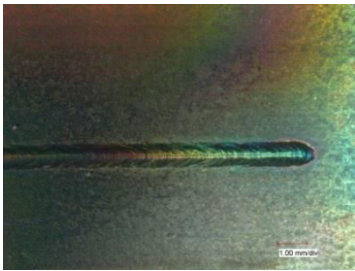


Abbildung 55: 500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

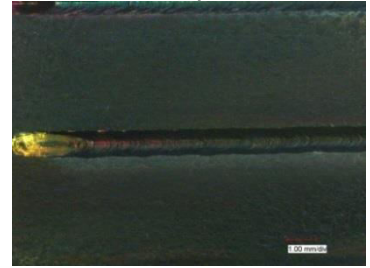
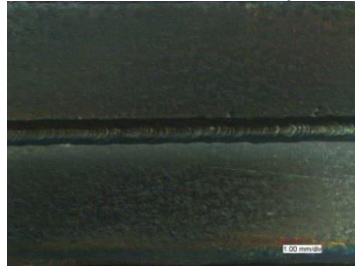
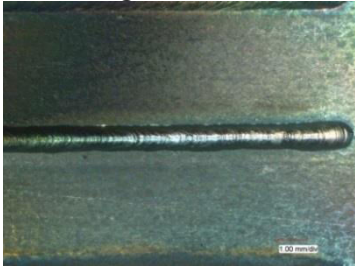


Abbildung 56: 1000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

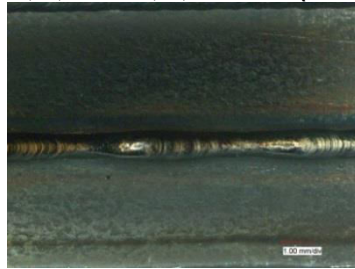


Abbildung 57: 1500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

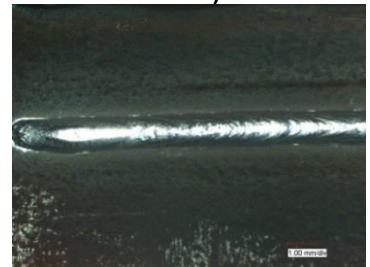
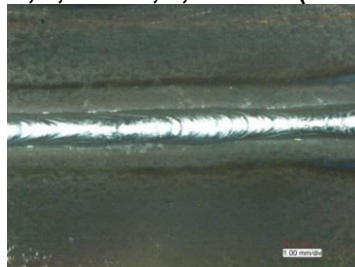
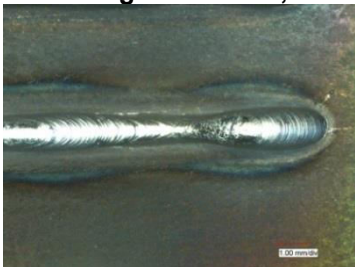
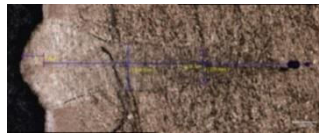
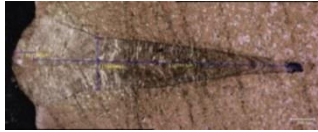


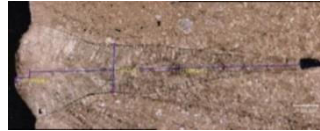
Abbildung 58: 2000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Querschliff Start, ET 2,22 mm



Querschliff Mitte, ET 2,249 mm



Querschliff Ende, ET 2,488 mm

**Abbildung 59: Def.-6 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 4,83 mm

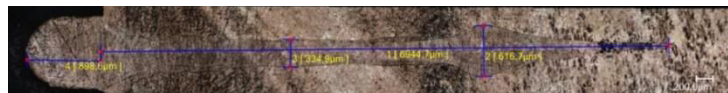


Querschliff Mitte, ET 5,16 mm



Querschliff Ende, ET 4,55 mm

**Abbildung 60: Def.-6 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 6,94 mm



Querschliff Mitte, ET 6,65 mm



Querschliff Ende, ET 6,276 mm

**Abbildung 61: Def.-6 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

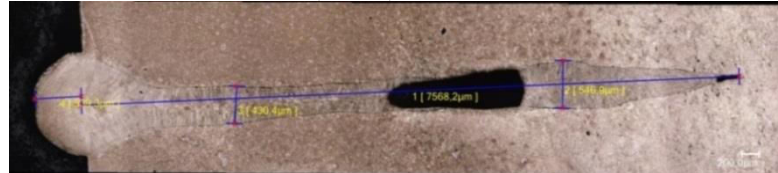




Querschliff Start, ET 7,406 mm



Querschliff Mitte, ET 7,254 mm



Querschliff Ende, ET 7,568 mm

**Abbildung 62: Def.-6 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Es wurde auch 4 Versuchen mit der Defokussierung von - 6 mm und dem Unterdruck von 0,1 mbar durchgeführt. Hier wurde auch konstante Schweißgeschwindigkeit von 1,2 m/min verwendet. Im Vergleich zu den Vorversuchen wurde hier kein Humping entstanden. Es wurde im Vergleich zur Versuch mit der Defokussierung von - 3 mm weniger Poren entdeckt. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass die maximale Einschweißtiefe von 7,57 mm kleiner ist als bei dem Versuch mit der Defokussierung - 3 mm von 8,79 mm.

#### 4.1.7 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 9 mm

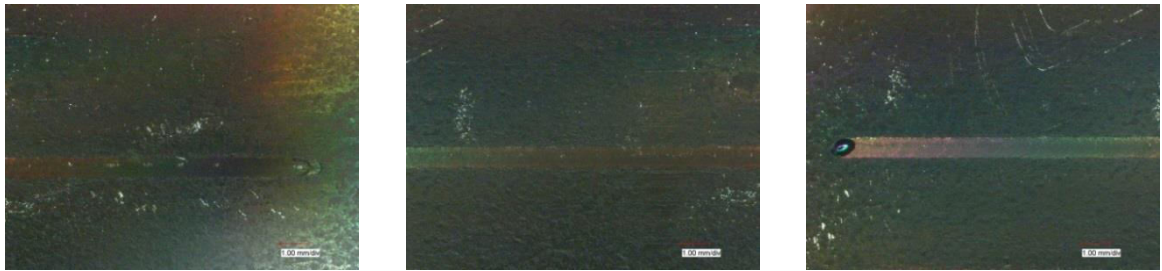


Abbildung 63: 500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Abbildung 64: 1000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

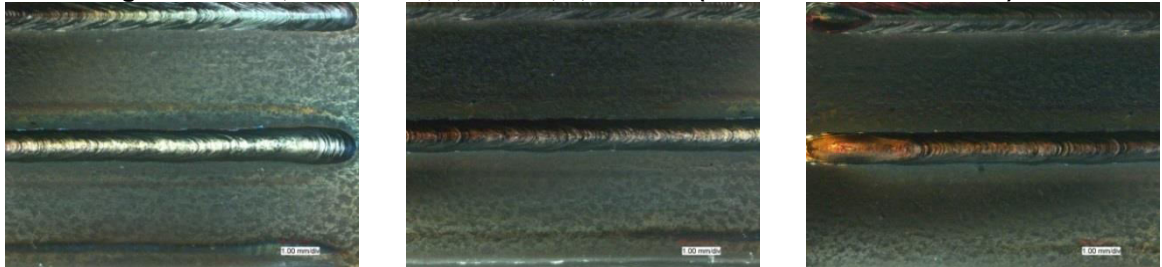


Abbildung 65: 1500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)

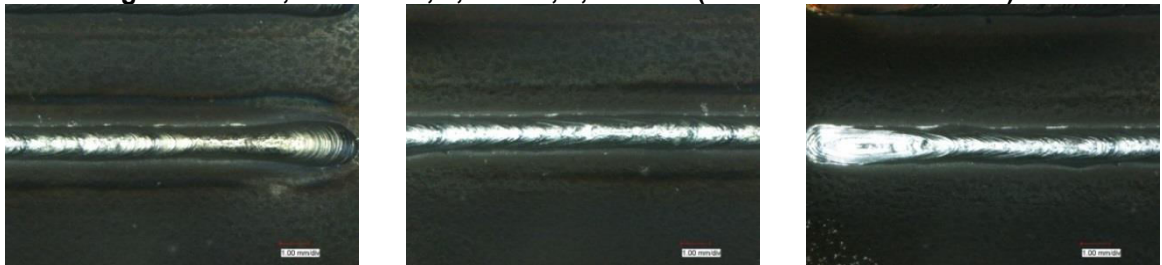
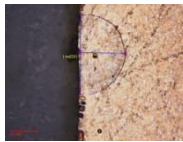
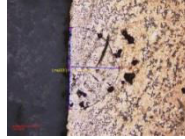


Abbildung 66: 2000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)



Querschliff Start, ET 0,357mm



Querschliff Mitte, ET 0,395mm

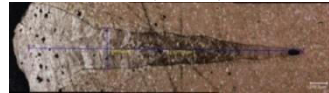


Querschliff Ende, ET 0,41mm

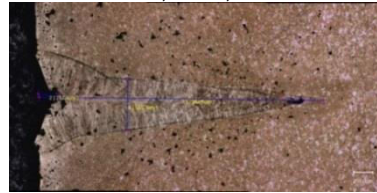
**Abbildung 67: Def.-9 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 2,826 mm



Querschliff Mitte, ET 3,275 mm



Querschliff Ende, ET 2,964 mm

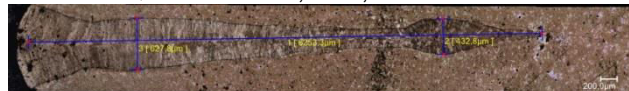
**Abbildung 68: Def.-9 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 6,913 mm

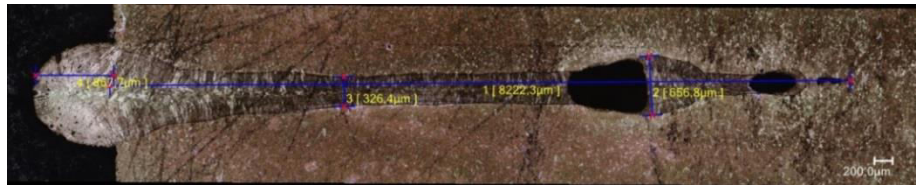


Querschliff Mitte, ET 6,446 mm



Querschliff Ende, ET 6,253 mm

**Abbildung 69: Def.-9 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 8,222 mm



Querschliff Mitte, ET 7,74 mm



Querschliff Ende, ET 6,828 mm

**Abbildung 70: Def.-9 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

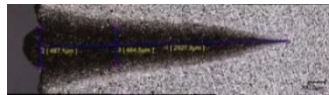
Bei der Defokussierung von - 9 mm wurden noch weniger Poren entdeckt. Versuche wurden auch mit Unterdruck von 0,1 mbar und einer Schweißgeschwindigkeit von 1,2 m/min. Auch wie bei der Defokussierung von -6 mm, wurde hier kein Humping entstanden. Die maximale Einschweißtiefe von 8,22 mm ist größer bei der Defokussierung von - 6 mm und kleiner als bei der Defokussierung - 3 mm.



## 4.2 Baustahl S355

Die Proben wurden genauso an drei Stellen getrennt bzw. am Anfang, in der Mitte und am Ende der Schweißnaht. Danach wurden Sie eingebettet mit Epofix. Am Ende wurden alle Proben mit Nital Ätzlösung geätzt.

### 4.2.1 Ergebnisse für einen Druck von 0,0001 mbar



Querschliff Start, ET 2,927 mm

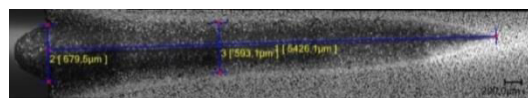


Querschliff Mitte, ET 2,857 mm

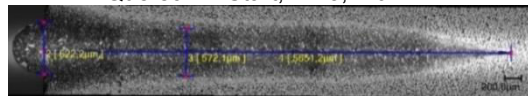


Querschliff Ende, ET 3,018 mm

Abbildung 71: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 5,426 mm



Querschliff Mitte, ET 5,651 mm

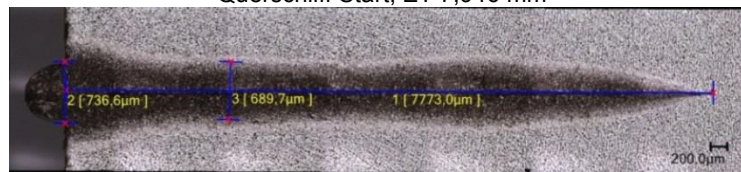


Querschliff Ende, ET 5,729 mm

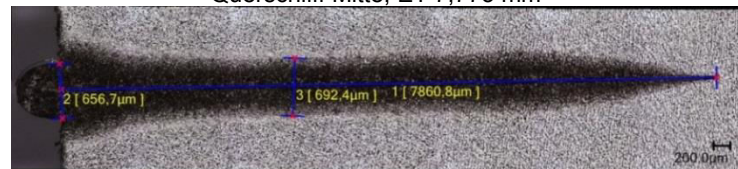
Abbildung 72: 1000 W, 0,0001mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 7,946 mm

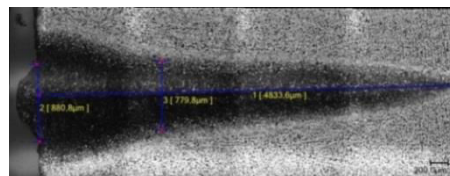


Querschliff Mitte, ET 7,773 mm

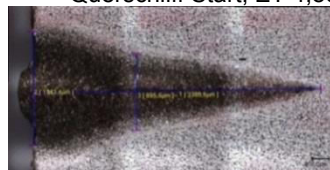


Querschliff Ende, ET 7,86 mm

**Abbildung 73: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 4,83 mm



Querschliff Mitte, ET 3,38 mm

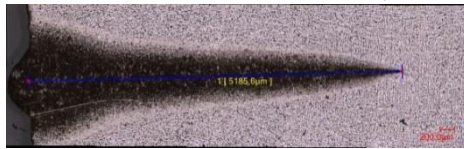


Querschliff Ende, ET 3,18 mm

**Abbildung 74: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 13,07 mm



Querschliff Mitte, ET 5,2 mm

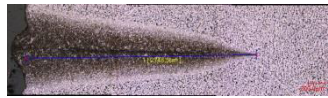


Querschliff Start, ET 3,6 mm

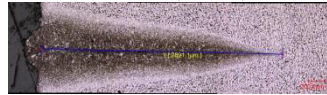
**Abbildung 75: 3000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min**

Es wurden fünf Schweißnähte mit dem Unterdruck von 0,0001 mbar erzeugt. Alle Schweißnähte weisen von außen sehr guter Nahtqualität aus. Es wurde gezeigt dass es weniger Poren bis gar keine entstehen. Ab der Laserleistung von 1000 W bis 2000 W könnte in der Wurzel Poren beobachtet werden. Mit steigender Laserleistung steigt auch die Einschweißtiefe. Es sind trotzdem verfälschte Werte vorhanden z.B. bei der Laserleistung 2000 W. Die maximale Einschweißtiefe beträgt 13,07 mm bei 3000 W.

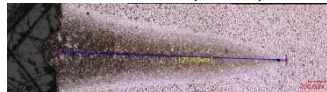
#### 4.2.2 Ergebnisse für einen Druck von 0,001 mbar



Querschliff Start, ET 2,7 mm

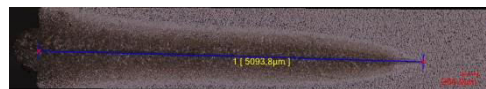


Querschliff Mitte, ET 2,9 mm

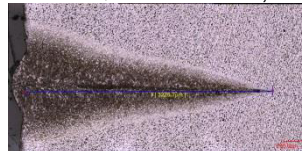


Querschliff Ende, ET 2,7 mm

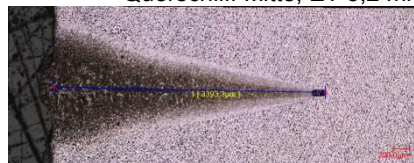
Abbildung 76: 500 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 5,1 mm

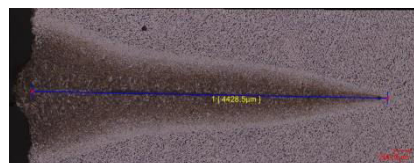


Querschliff Mitte, ET 3,2 mm

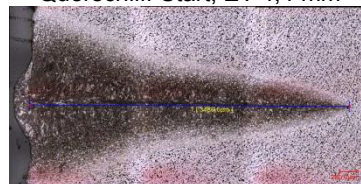


Querschliff Ende, ET 3,4 mm

Abbildung 77: 1000 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,4 mm



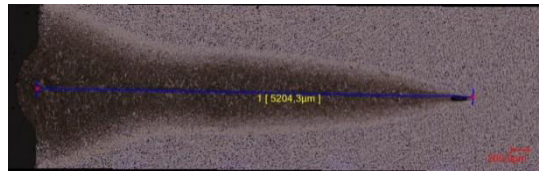
Querschliff Mitte, ET 3,5 mm



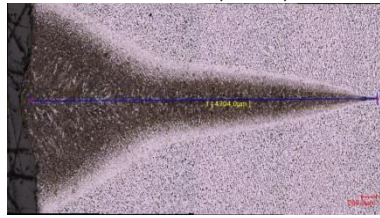
Querschliff Ende, ET 3,3

Abbildung 78: 1500 W, 0,001mbar, 1,2 m/min

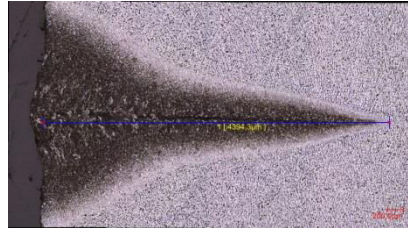




Querschliff Start, ET 5,2 mm

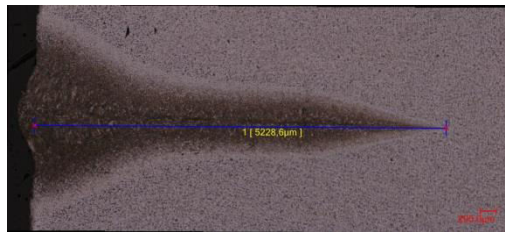


Querschliff Mitte, ET 4,4 mm

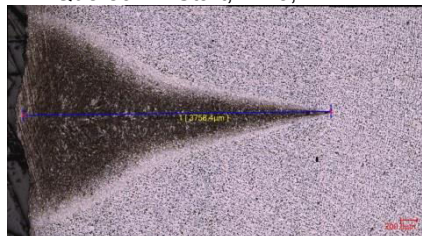


Querschliff Ende, ET 4,4 mm

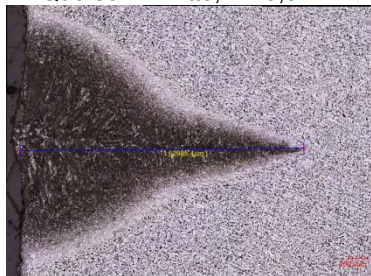
**Abbildung 79: 2000 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 5,2 mm



Querschliff Mitte, ET 3,8 mm



Querschliff Ende, ET 3 mm

**Abbildung 80: 3000 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min**

Versuche mit dem Unterdruck von 0,001 mbar wurden nicht erfolgreich. Die maximale Eindringtiefe beträgt 5,2 mm bei der Laserleistung von 3000 W.

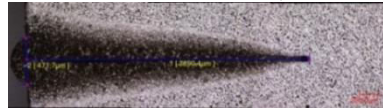
### 4.2.3 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar



Querschliff Start – ET 2,848 mm

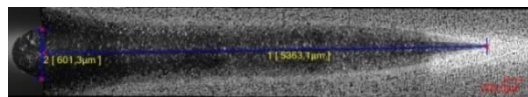


Querschliff Mitte – ET 2,91 mm

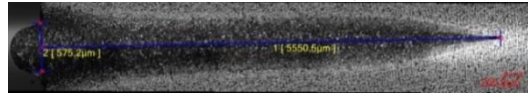


Querschliff Ende – ET 2,89 mm

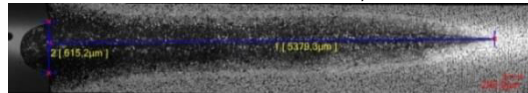
Abbildung 81: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start – ET 5,363 mm



Querschliff Mitte – ET 5,55 mm

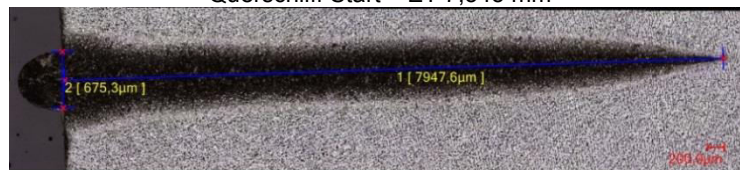


Querschliff Ende – ET 5,38 mm

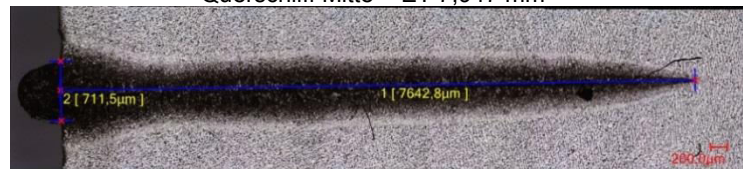
Abbildung 82: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start – ET 7,545 mm



Querschliff Mitte – ET 7,947 mm



Querschliff Ende – ET 7,642 mm

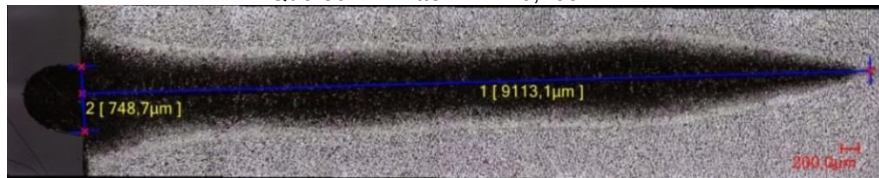
Abbildung 83: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start – ET 9,99 mm

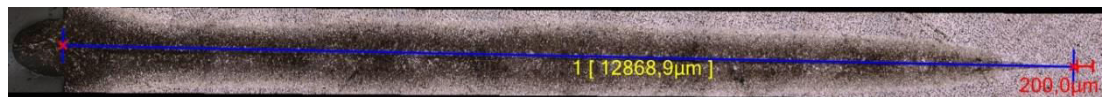


Querschliff Mitte – ET 10,108 mm

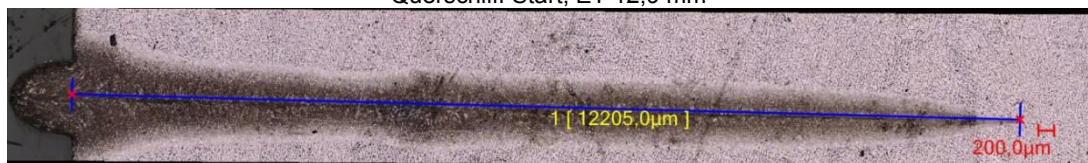


Querschliff Ende – ET 9,113 mm

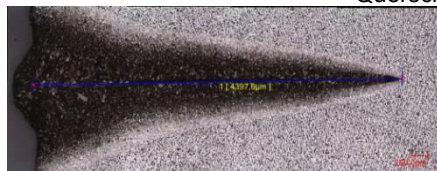
**Abbildung 84: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 12,9 mm



Querschliff Mitte, ET 12,2 mm



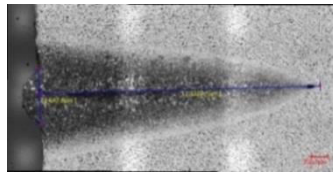
Querschliff Ende, ET 4,4 mm

**Abbildung 85: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

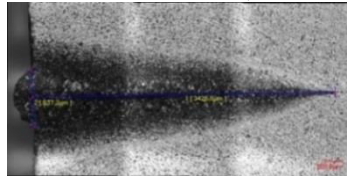
Bei dem Unterdruck von 0,1 mbar wurden fünf Schweißnähte erzeugt. Die maximale Einschweißtiefe beträgt 12,9 mm bei 3000 W.



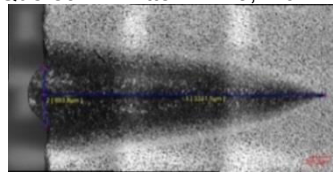
#### 4.2.4 Ergebnisse für einen Druck von 0,1mbar bei 0,6m/min



Querschliff Start – ET 3,32 mm

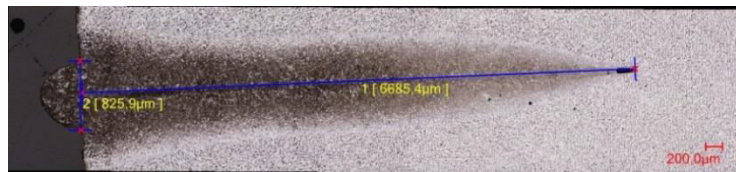


Querschliff Mitte – ET 3,426 mm



Querschliff Ende – ET 3,32 mm

**Abbildung 86: 500 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min**



Querschliff Start – ET 6,685 mm

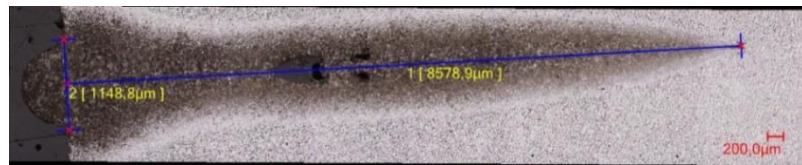


Querschliff Mitte – ET 6,517 mm

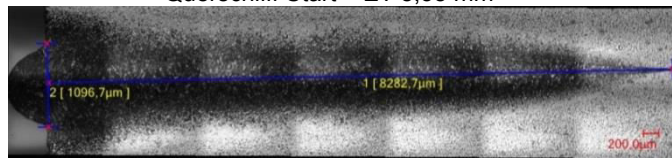


Querschliff Ende – ET 6,768 mm

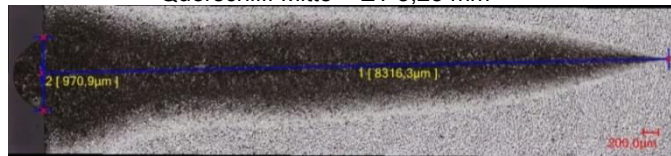
**Abbildung 87: 1000 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min**



Querschliff Start – ET 8,58 mm



Querschliff Mitte – ET 8,28 mm

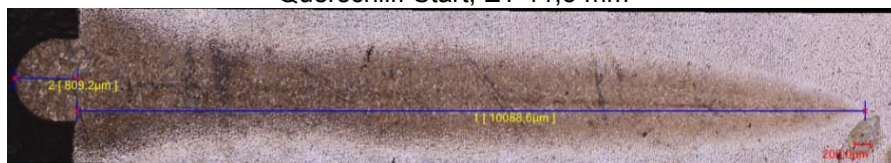


Querschliff Ende – ET 8,316 mm

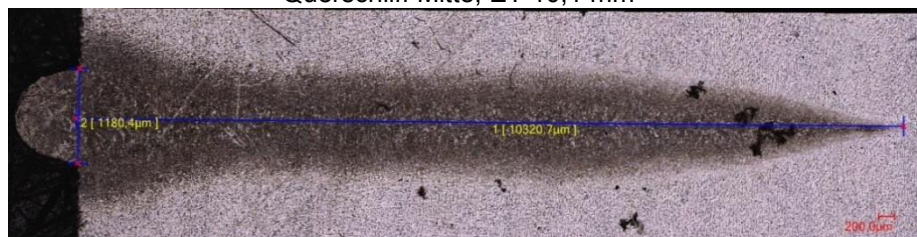
**Abbildung 88: 1500 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min**



Querschliff Start, ET 11,3 mm



Querschliff Mitte, ET 10,1 mm

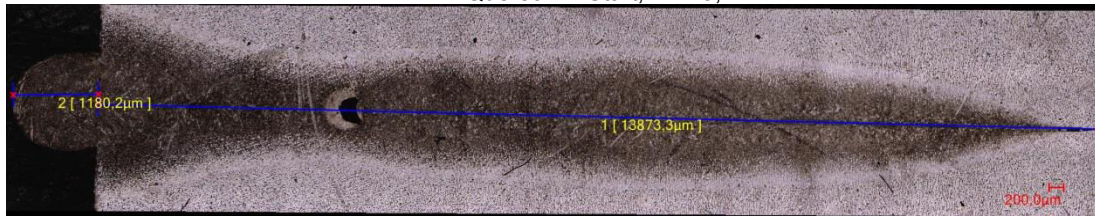


Querschliff Ende, ET 10,3 mm

**Abbildung 89: 2000 W, 0,1 mbar, 0,6m/min**



Querschliff Start, ET 15,4 mm



Querschliff Mitte, ET 13,9 mm



Querschliff Ende, ET 12,8 mm

**Abbildung 90: 3000 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min**

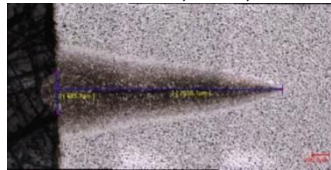
Mit der kleineren Geschwindigkeit von 0,6 m/min und gleichem Druck von 0,1 mbar wurde größte Einschweißtiefe von 15,4 mm erreicht mit der Laserleistung von 3000 W. Die Schweißnaht weist kleinere Porenbildung auf.



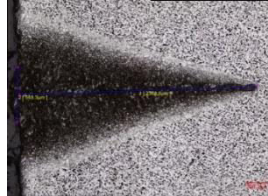
#### 4.2.5 Ergebnisse für einen Druck von 10 mbar



Querschliff Start, ET 2,779 mm

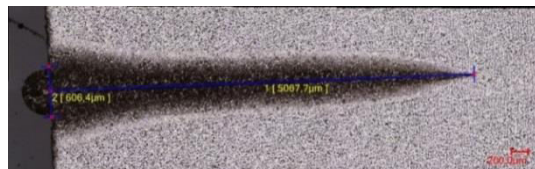


Querschliff Mitte, ET 2,656 mm

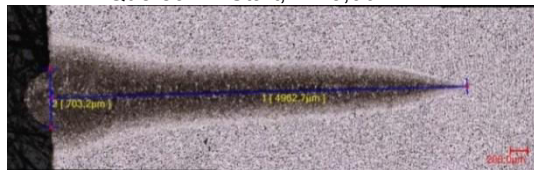


Querschliff Ende, ET 2,368 mm

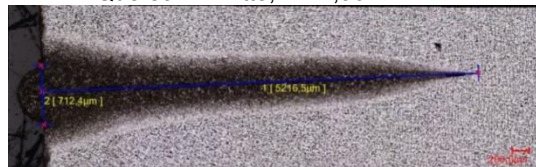
**Abbildung 91: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 5,067 mm

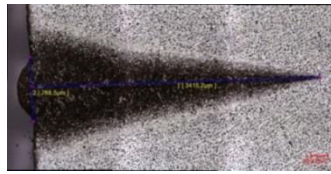


Querschliff Mitte, ET 4,962 mm

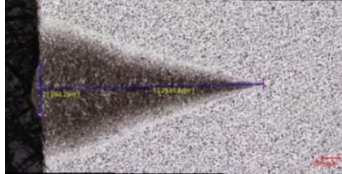


Querschliff Ende, ET 5,216 mm

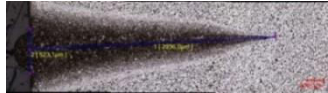
**Abbildung 92: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start. ET 3,42mm



Querschliff Mitte, ET 2,54 mm



Querschliff Ende, ET 2,54 mm

**Abbildung 93: 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min**

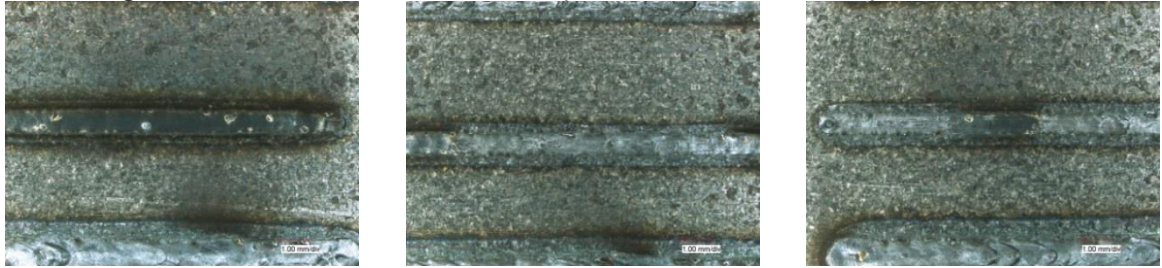
Maximale Einschweißtiefe bei 1000 W beträgt 5,2 mm.



#### 4.2.6 Ergebnisse für einen Druck von 1000 mbar



**Abbildung 94: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



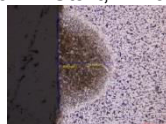
**Abbildung 95: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



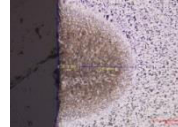
**Abbildung 96: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende)**



Querschliff Start, ET 0,58 mm

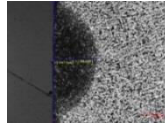


Querschliff Mitte, ET 0,48 mm

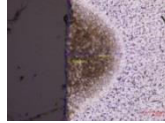


Querschliff Ende, ET 0,63 mm

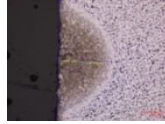
**Abbildung 97: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 0,38mm

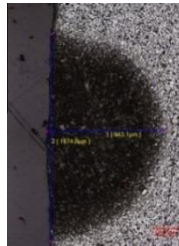


Querschliff Mitte, ET 0,49 mm

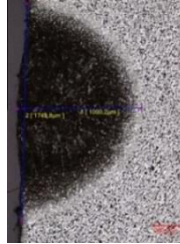


Querschliff Ende, ET 0,474 mm

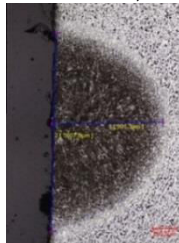
**Abbildung 98: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 0,943 mm



Querschliff Mitte, ET 1 mm



Querschliff Ende, ET 0,9 mm

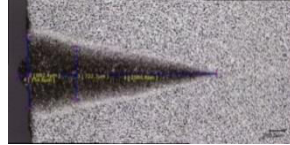
**Abbildung 99: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min**

Bei einem Druck von 1000 mbar wurde auch bei dem Baustahl kleinste Einschweißtiefe erreicht. Maximale Einschweißtiefe hier beträgt 1 mm bei 1500 W.

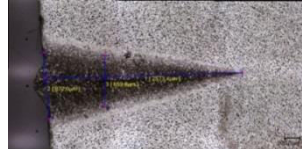
#### 4.2.7 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 3 mm



Querschliff Start, ET 2,76 mm

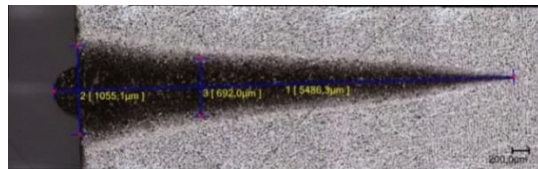


Querschliff Mitte, ET 2,58 mm

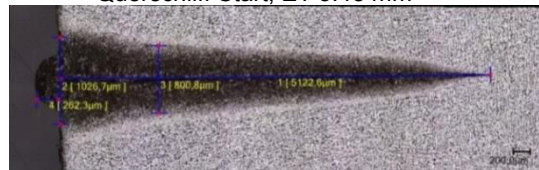


Querschliffe Ende, ET 2,573 mm

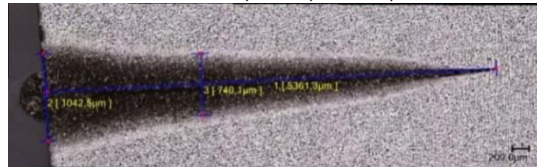
Abbildung 100: Def.-3 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 5,48 mm



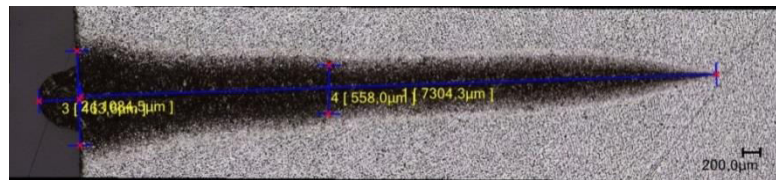
Querschliff Mitte, ET 5,12 mm,



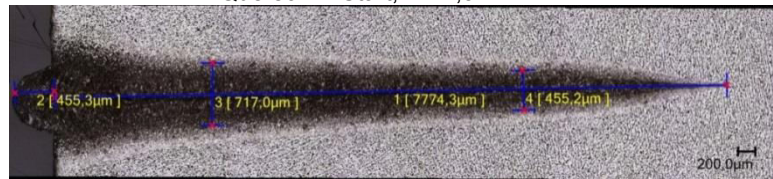
Querschliff Ende, ET 5,361 mm

Abbildung 101: Def.-3 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min

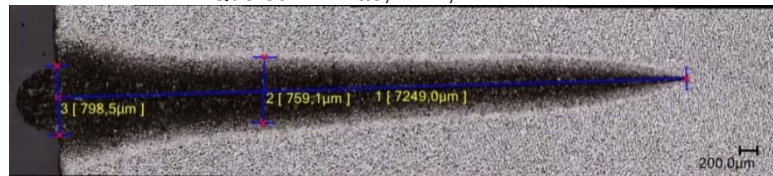




Querschliff Start, ET 7,3 mm

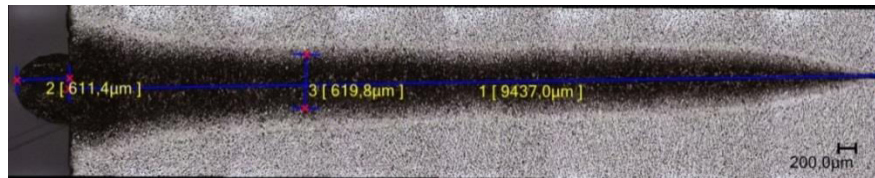


Querschliff Mitte, ET 7,774 mm

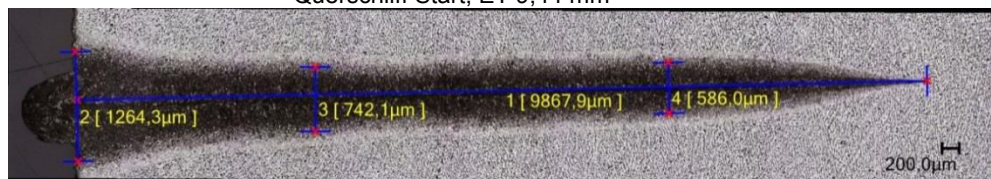


Querschliff Ende, ET 7,25 mm

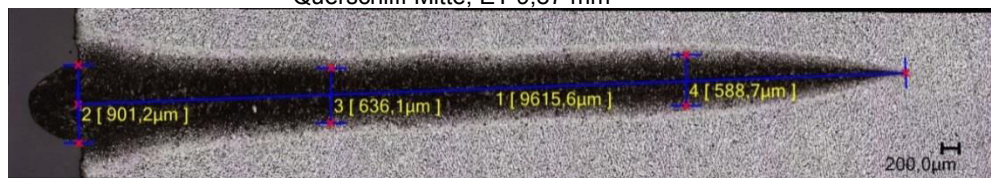
**Abbildung 102: Def.-3 mm, 1500W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 9,44 mm



Querschliff Mitte, ET 9,87 mm

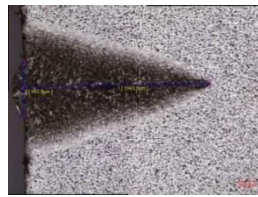


Querschliff Ende, ET 9,615 mm

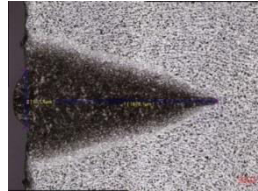
**Abbildung 103: Def.-3 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Mit der Defokussierung von - 3 mm sinkt die Einschweißtiefe allmählich. Maximale Einschweißtiefe beträgt 9,8 mm.

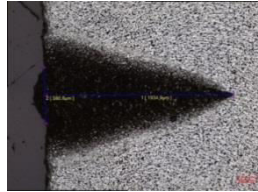
#### 4.2.8 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 6 mm



Querschliff Start, ET 1,943 mm

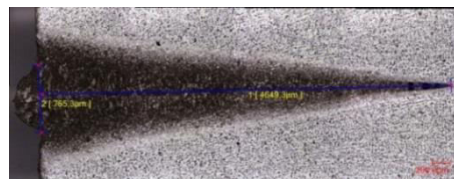


Querschliff Mitte, ET 1,978 mm

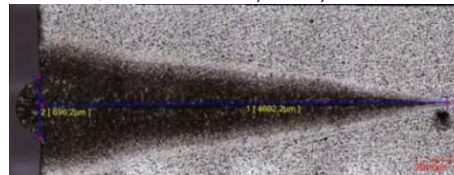


Querschliff Ende, ET 1,934 mm

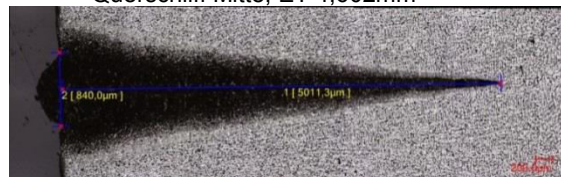
Abbildung 104: Def.-6 mm, 500 W 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,65mm



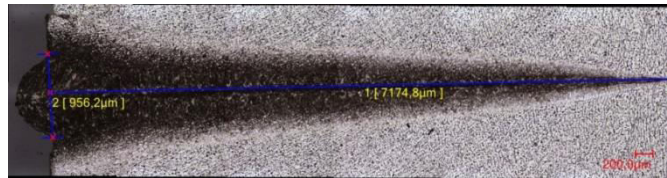
Querschliff Mitte, ET 4,602mm



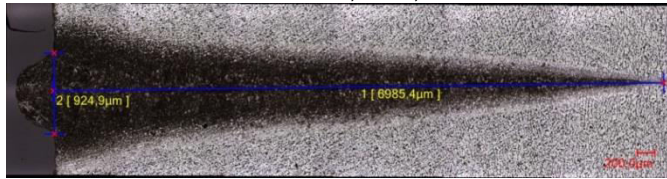
Querschliff Ende, ET 5,011 mm

Abbildung 105: Def.-6 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min

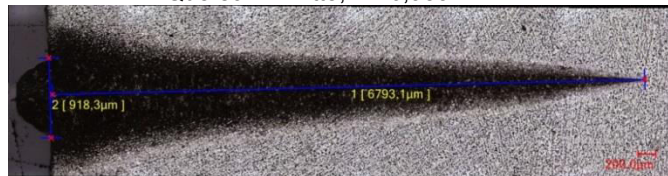




Querschliff Start, ET 7,174 mm

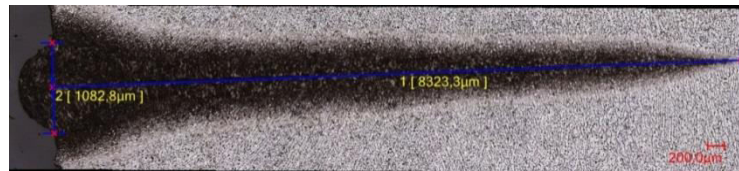


Querschliff Mitte, ET 6,985 mm

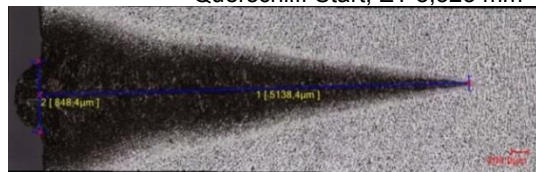


Querschliff Ende, ET, 6,793 mm

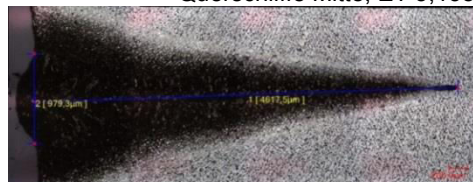
**Abbildung 106: Def.-6mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 8,323 mm



Querschliffe Mitte, ET 5,138 mm

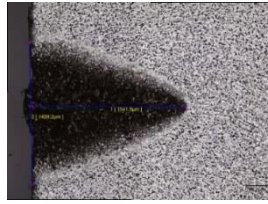


Querschliff Ende, ET 4,617 mm

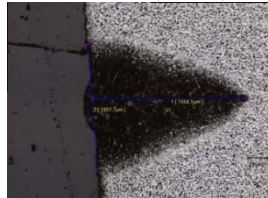
**Abbildung 107: Def.-6 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Mit der Defokussierung von - 6 mm sinkt die Einschweißtiefe weiter. Maximale Einschweißtiefe beträgt 8,323 mm.

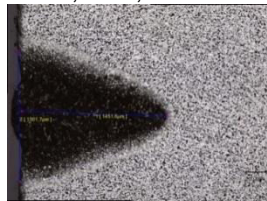
#### 4.2.9 Ergebnisse für eine Defokussierung von - 9 mm



Querschliff Start, ET 1,54 mm

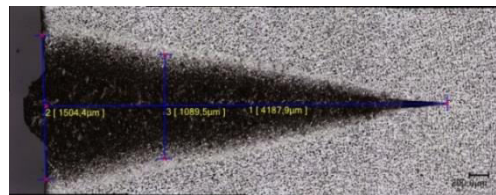


Querschliff Mitte, ET 1,554 mm

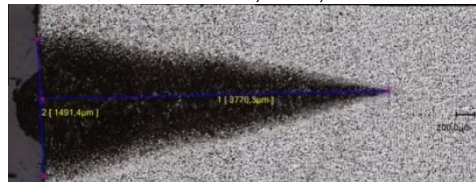


Querschliff Ende, ET 1,45 mm

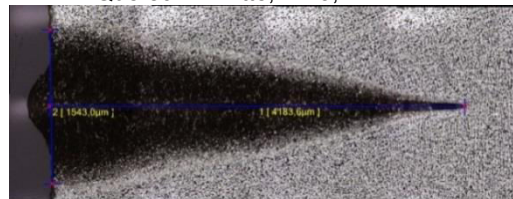
Abbildung 108: Def.-9 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,187 mm

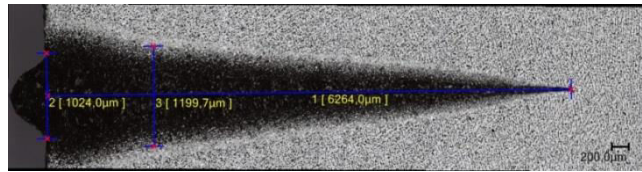


Querschliff Mitte, ET 3,77 mm

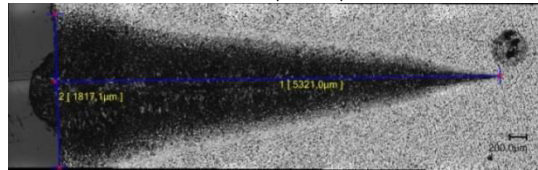


Querschliff Ende, ET 4,183 mm

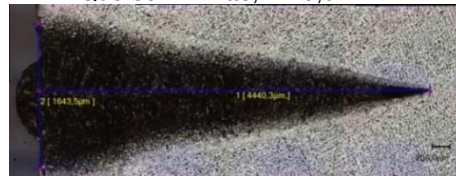
Abbildung 109: Def.-9 mm 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 6,26 mm

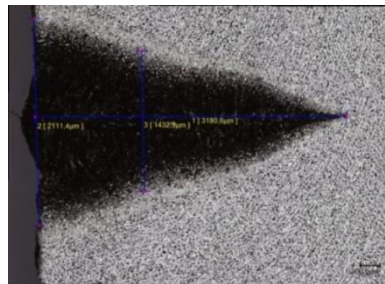


Querschliff Mitte, ET 5,32 mm

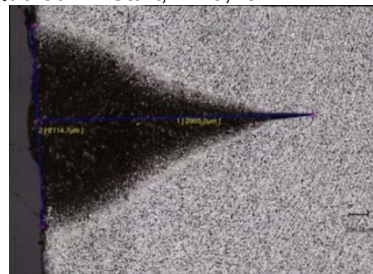


Querschliff Ende, ET 4,44 mm

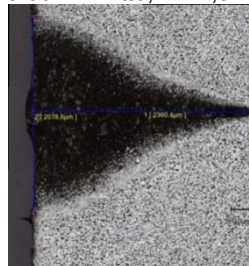
**Abbildung 110: Def.-9 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 3,18 mm



Querschliff Mitte, ET 2,91 mm

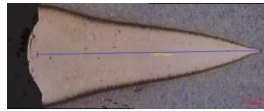


Querschliff Ende, ET 2,36 mm

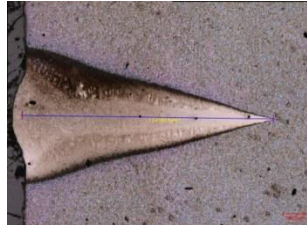
**Abbildung 111: Def.-9 mm 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Mit der Defokussierung von - 9 mm wurde kleinste Einschweißtiefe erreicht im Vergleich zur alle Defokussierungen von 0 bis - 6 mm.

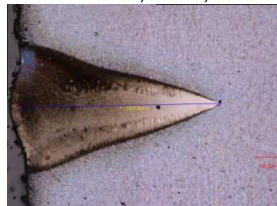
#### 4.3 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Kaltarbeitsstahl 1.2842 ( 90MnCrV8)



Querschliff Start, ET 2,3 mm

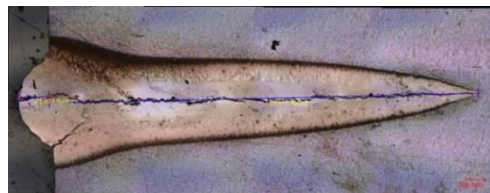


Querschliff Mitte, ET 2,2 mm

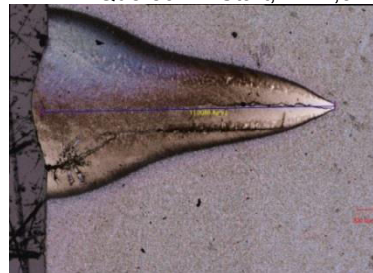


Querschliff Ende, ET 1,9 mm

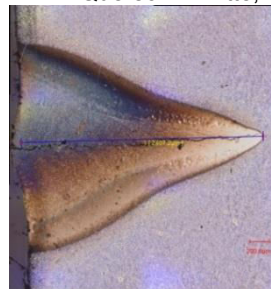
Abbildung 112: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,5 mm



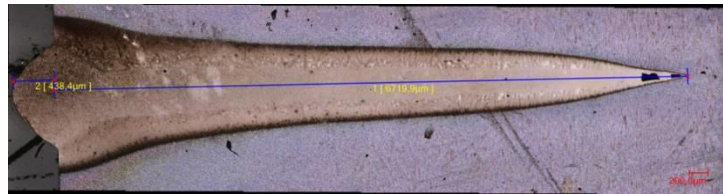
Querschliff Mitte, ET 3 mm



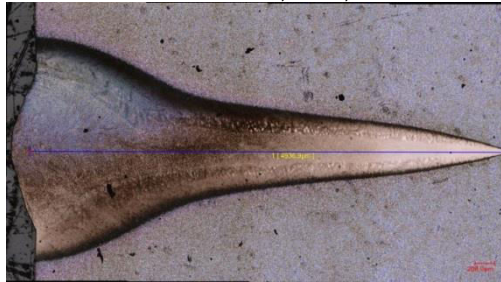
Querschliff Ende, ET 2,4 mm

Abbildung 113: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min

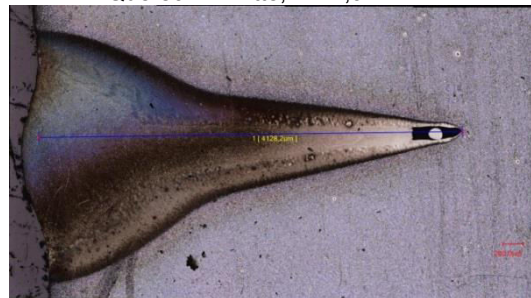




Querschliff Start, ET 6,7 mm

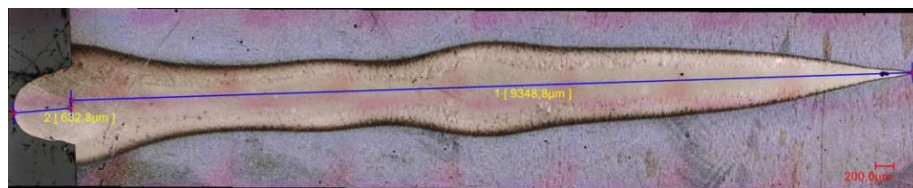


Querschliff Mitte, ET 4,9 mm

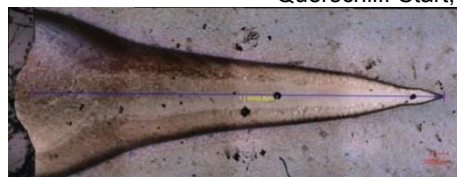


Querschliff Ende, ET 4,1 mm

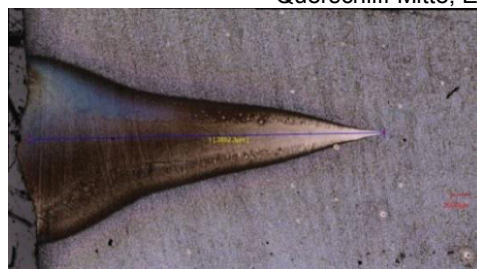
**Abbildung 114: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2m/min**



Querschliff Start, ET 9,3 mm

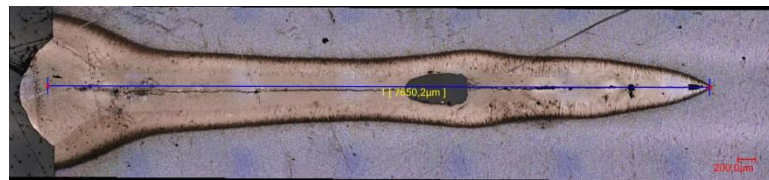


Querschliff Mitte, ET 4,7 mm

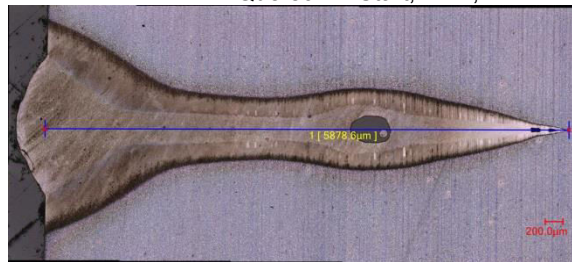


Querschliff Ende, ET 3,8 mm

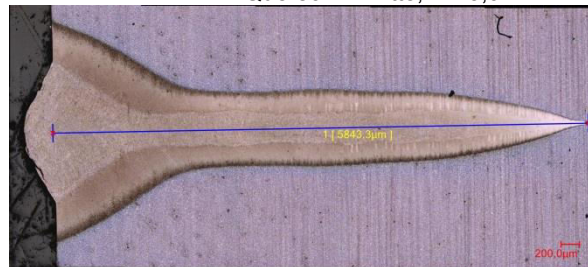
**Abbildung 115: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 7,7 mm



Querschliff Mitte, ET 5,9 mm



Querschliff Ende, ET 5,8 mm

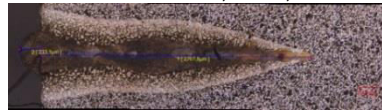
**Abbildung 116: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Die maximale erreichbare Einschweißtiefe beträgt 9,3 mm bei 2000 W Laserleistung. Bei den Versuchen mit den Leistungen 1000 W und 3000 W wurde Rissbildung bzw. Nahtmit-  
tenrisse entdeckt. Es wurde auch andere Schweißnahtfehler wie Poren in der Schweiß-  
naht ermittelt.

#### 4.4 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Unlegierte Vergütungsstahl 1.0503 (C45)



Querschliff Mitte, ET 2,5 mm

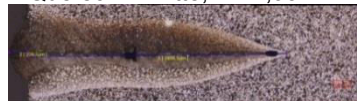


Querschliff Ende, ET 2,7 mm

Abbildung 117: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Mitte, ET 2,95 mm



Querschliff Ende, ET 2,9 mm

Abbildung 118: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min

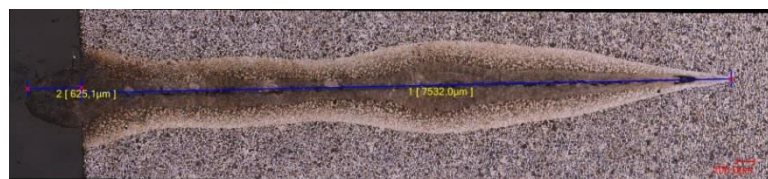


Querschliff Mitte, ET 5,6 mm

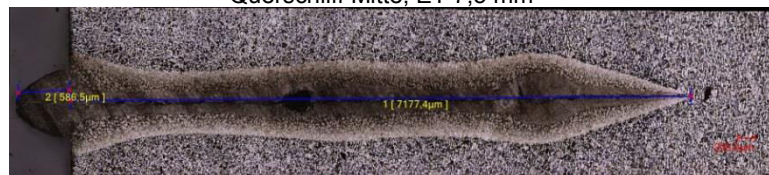


Querschliff Ende, ET 5,03 mm

Abbildung 119: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



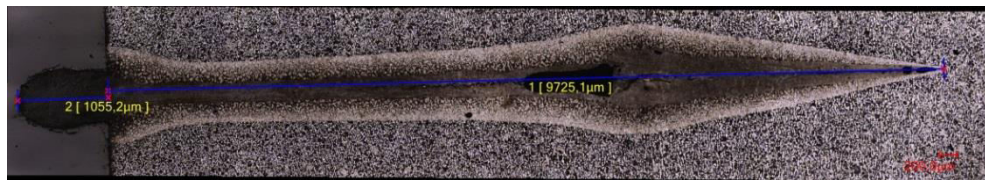
Querschliff Mitte, ET 7,5 mm



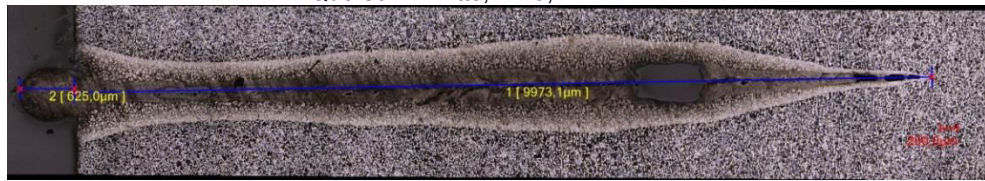
Querschliff Ende, ET 7,2 mm

Abbildung 120: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min





Querschliff Mitte, ET 9,7 mm



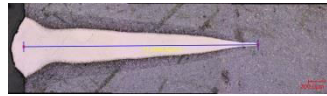
Querschliff Ende, ET 9,9 mm

**Abbildung 121: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

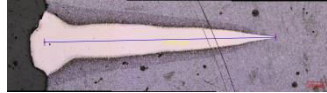
Der Querschliff Start wurde zwei Mal poliert und geätzt. Es wurden keine sichtbaren Ergebnisse rausgekommen. Die Ätzmittel konnten die Schweißnaht nicht angreifen. Damit wurde diese Probe aus der Auswertung rausgenommen. In der Schweißnaht konnten Poren beobachtet werden. Die maximale Eindringtiefe beträgt 9,9 mm bei der Laserleistung von 3000 W.



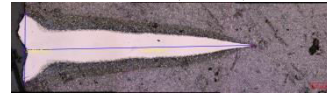
#### 4.5 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Kaltarbeitswerkzeugstahl 1.2379 (X155CrVMo121)



Querschliff Start, ET 2,8 mm



Querschliff Mitte, ET 2,8 mm

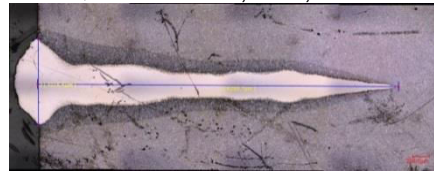


Querschliff Ende, ET 2,7 mm

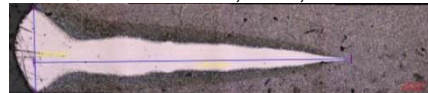
Abbildung 122: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,8 mm



Querschliff Mitte, ET 4,3 mm

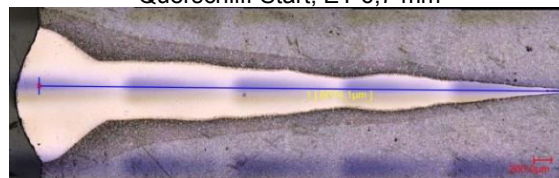


Querschliff Ende, ET 3,8 mm

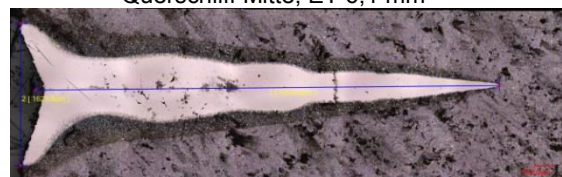
Abbildung 123: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 6,7 mm

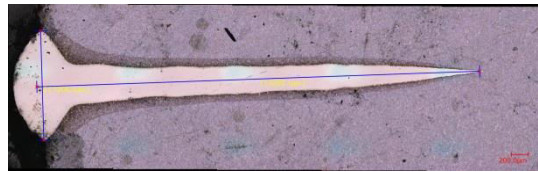


Querschliff Mitte, ET 6,1 mm

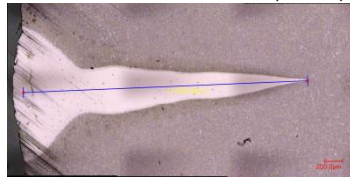


Querschliff Ende, ET 5,3 mm

Abbildung 124: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 5,3 mm

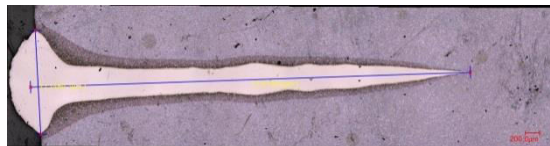


Querschliff Mitte, ET 3,2 mm

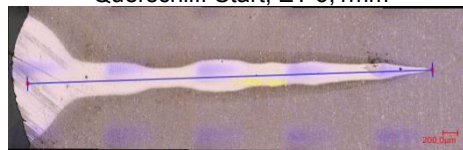


Querschliff Ende, ET 3 mm

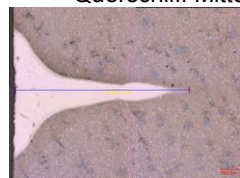
**Abbildung 125: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 6,1mm



Querschliff Mitte, ET 5,6mm

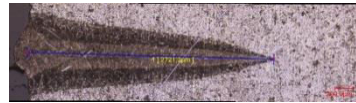


Querschliff Ende, ET 2 mm

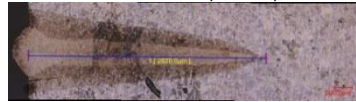
**Abbildung 126: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Die maximale Einschweißtiefe beträgt 6,1 mm bei der Laserleistung von 3000 W.

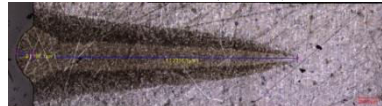
#### 4.6 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Einsatzstahl 1.2162 (21MnCr5)



Querschliff Start, ET 2,7 mm



Querschliff Mitte, ET 2,6 mm

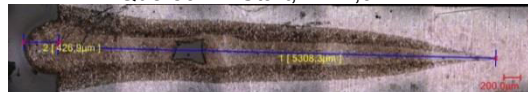


Querschliff Ende, ET 2,7 mm

**Abbildung 127: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 4,9 mm

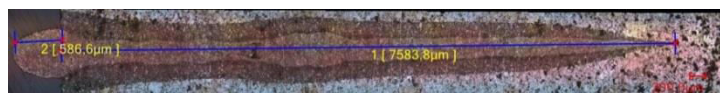


Querschliff Mitte, ET 5,3 mm



Querschliff Ende, ET 5,3 mm

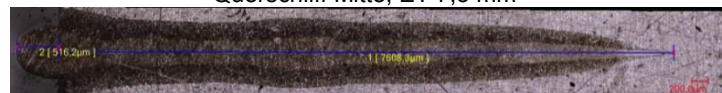
**Abbildung 128: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 7,6 mm



Querschliff Mitte, ET 7,3 mm

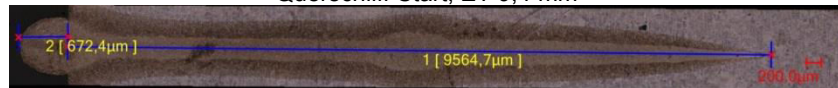


Querschliff Ende, ET 7,6 mm

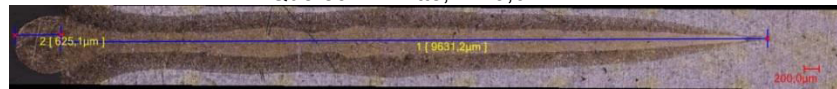
**Abbildung 129: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 9,4 mm

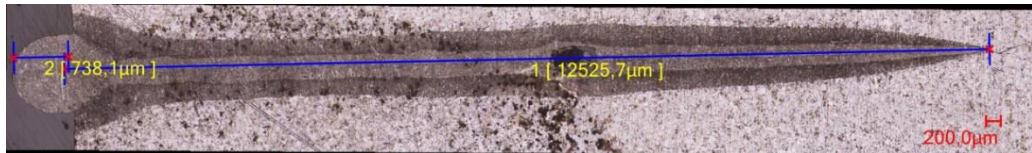


Querschliff Mitte, ET 9,6 mm

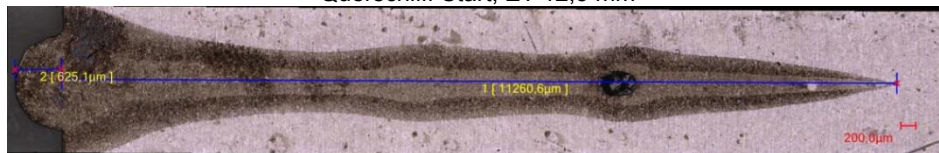


Querschliff Ende, ET 9,6 mm

**Abbildung 130: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 12,5 mm



Querschliff Mitte, ET 11,2 mm



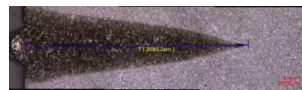
Querschliff Ende, ET 8 mm

**Abbildung 131: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

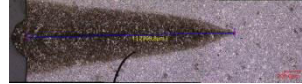
Die maximale Einschweißtiefe beträgt 12,5 mm bei der Laserleistung von 3000 W. Die Schweißnähte zeigten sehr gute Nahtqualität auf.



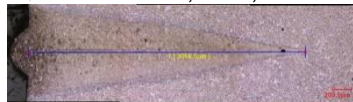
#### 4.7 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5)



Querschliff Start, ET 2,9 mm



Querschliff Mitte, ET 2,7 mm

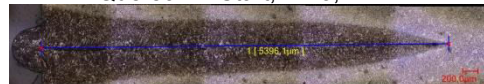


Querschliff Ende, ET 3,1 mm

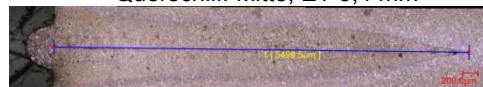
Abbildung 132: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 5,4 mm

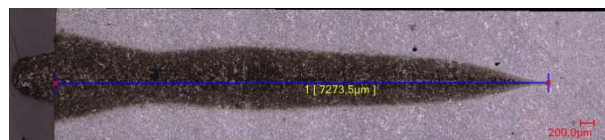


Querschliff Mitte, ET 5,4 mm

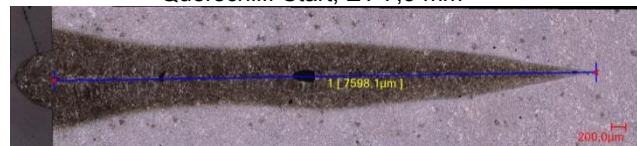


Querschliff Ende, ET 5,5 mm

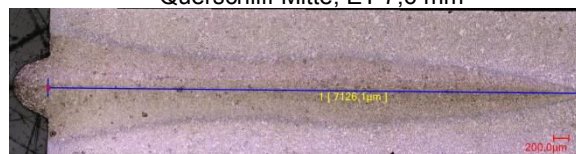
Abbildung 133: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 7,3 mm

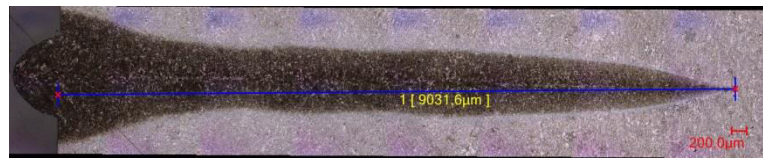


Querschliff Mitte, ET 7,6 mm

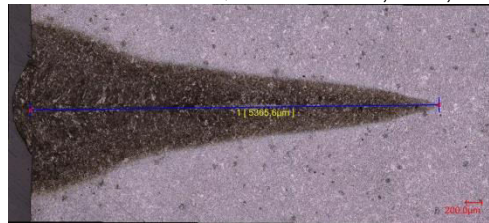


Querschliff Ende, ET 7,1 mm

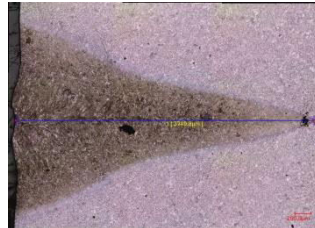
Abbildung 134: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 9,03 mm

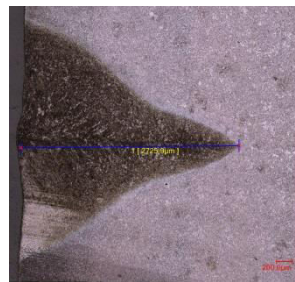


Querschliff Mitte, ET 5,4 mm



Querschliff Ende, ET 3,8 mm

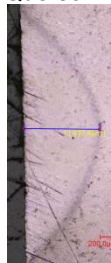
**Abbildung 135: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 2,7



Querschliff Mitte, ET 1,5 mm

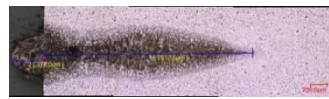


Querschliff Ende, ET 0,9 mm

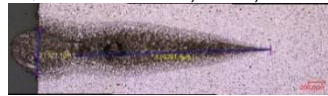
**Abbildung 136: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Die Schweißnähte weisen sehr gute Nahtqualität auf. Die maximale Einschweißtiefe beträgt 9,03 mm bei der Laserleistung von 2000 W.

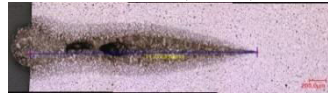
#### 4.8 Ergebnisse für einen Druck von 0,1 mbar bei unlegierte Baustahl 1.0037/S235



Querschliff Start, ET 2,5 mm

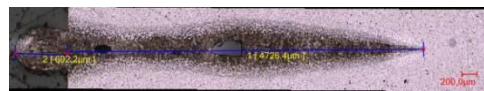


Querschliff Mitte, ET 2,8 mm

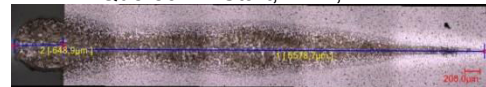


Querschliff Ende, ET 2,7 mm

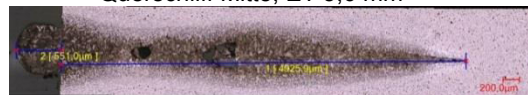
Abbildung 137: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 4,7 mm



Querschliff Mitte, ET 5,6 mm

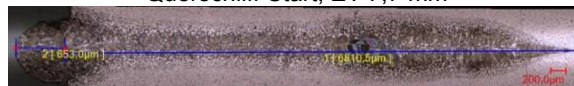


Querschliff Ende, ET 5 mm

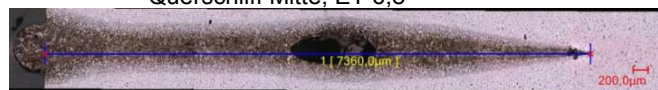
Abbildung 138: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 7,7 mm

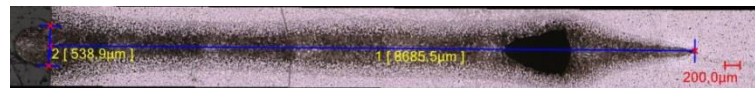


Querschliff Mitte, ET 6,8



Querschliff Ende, ET 7,4 mm

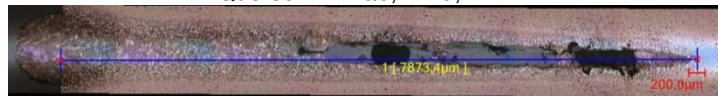
Abbildung 139: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Querschliff Start, ET 8,7 mm

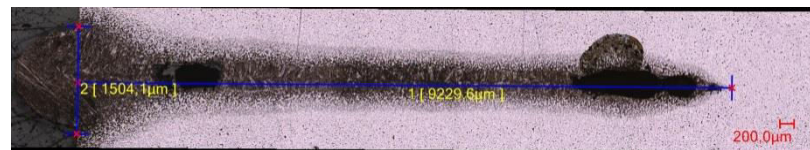


Querschliff Mitte, ET 9,4 mm

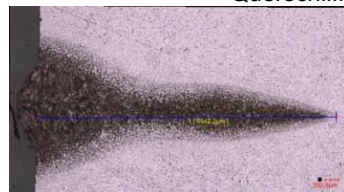


Querschliff Ende, ET 7,9 mm

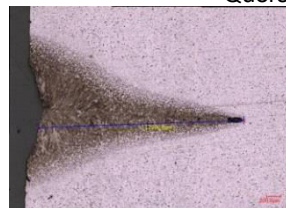
**Abbildung 140: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**



Querschliff Start, ET 9,2 mm



Querschliff Mitte, ET 4,5 mm



Querschliff Start, ET 2,9

**Abbildung 141: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min**

Es wurden viele Schweißnahtfehler wie Poren in der Schweißnaht ermittelt. Die maximale Einschweißtiefe beträgt 9,4 mm bei der Laserleistung von 2000 W.



## 5 Auswertung

Für die Versuchsauswertung wurden die geschweißten Proben der Stähle: nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10, ein Baustahl S355, ein Kaltarbeitswerkzeugstahl 90MnCrV8, ein unlegierter Vergütungsstahl C45, ein Kaltarbeitswerkzeugstahl X155CrVMo121, ein Einsatzstahl 21MnCr5, ein Einsatzstahl 16MnCr5 und ein unlegierter Baustahl S235 (1.0037) ausgewählt. Es sollte gezeigt werden, welche Stähle für Laserstrahlschweißen unter dem Vakuum besser geeignet sind. Diese Werkstoffe wurden mit einem Unterdruck von 0,0001 bis 1000 mbar, sowie mit einer Defokussierung von 0 mm bis - 9 mm geschweißt. Alle Versuche mit der Defokussierung wurden bei dem Unterdruck von 0,1 mbar durchgeführt. Alle Versuche wurden mit einer eingestellten Laserstrahlleistung von 570 W bis 3131 W und einer konstanten Schweißgeschwindigkeit von 1,2 m/min, bei einem Versuch auch mit einer kleineren Geschwindigkeit von 0,6 m/min, durchgeführt. In den Schweißversuchen wurden bei einigen Versuchen trotz bei der Wiederholung der Versuche, großen Schwankungen bei den Eindringtiefen ermittelt. Das bedeutet, dass die Einschweißtiefe stark abnahm. Als eine Ursache wurden in diesen Fällen extrem belastete Spiegel ermittelt (siehe Abb. 142). Der Schweißprozess wurde optimiert und diese Versuche entsprechend wiederholt. Beispielhaft ist ein Diagramm zur Einschweißtiefe mit den verfälschten Werten in der Abb. 143 dargestellt.



Abbildung 142: Defekte am Spiegel durch abströmenden Metall-  
dampf während des Schweißprozesses bei höheren Laserstrahl-  
leistungen

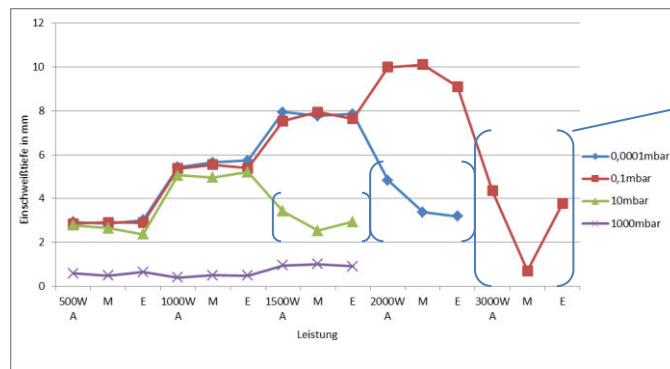


Abbildung 143: Schweißergebnisse beim Baustahl S355 (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

**Bei einem Unterdruck von 0,0001 mbar** wurden bei dem X5CrNi18-10 in jedem Schliff Poren gebildet. Ab der Leistung von 1000 W bis 2000 W ist Humping entstanden. Der Abstand einer Humping-Periode wurde bei 1000 W von 2,74 mm, bei 1500 W 1,68 mm und bei 2000 W 3,5 mm gemessen. Die Schweißnahtbreite blieb nicht konstant. Es zeigte sich, dass die Vergrößerung der Nahtbreite bei jeder Schweißnaht fast an der gleichen Stelle, kurz vom Ende der Schweißnaht, lag. Innerhalb der Schweißnaht war die Einschweißtiefe auch nicht konstant. Die maximale erreichte Einschweißtiefe betrug beim X5CrNi18-10 bei einem Unterdruck von 0,0001 mbar 8,99 mm bei einer Laserstrahlleistung von 2000 W. Beim Baustahl S355 wurde bei demselben Unterdruck im Bereich Schweißnaht bessere Ergebnisse beobachtet. Es wurden porenfreie Schweißnähte bzw. kleine Poren in der Wurzel gefunden. Die Schweißnahtbreite war beim Baustahl S355 annähernd konstant. Die Einschweißtiefe blieb auch hier nicht konstant. Der Unterschied liegt maximal aber bei 0,2 mm. Die maximale erreichte Einschweißtiefe war beim Baustahl S355 bei dem Unterdruck 0,0001 mbar 13,07 mm mit der Laserleistung von 3000 W.

**Bei einem Unterdruck von 0,001 mbar** waren beim Baustahl S355 keine relevanten Ergebnisse zu erzielen. Die Einschweißtiefen waren kleiner als mit dem Unterdruck von 0,0001 mbar und 0,1 mbar. Als eine Ursache der abweichenden Werte konnte der defekte Spiegel ermittelt. Die maximale erreichte Einschweißtiefe betrug 5,2 mm bei der Laserleistung von 3000 W.

**Auch bei einem Unterdruck von 0,1 mbar** wurden bei dem X5CrNi18-10 in jedem Schliff Poren gefunden. Ab der Laserleistung von 1000 W bis 2000 W wurde trat auch hier Humping auf. Der Abstand einer Humping-Periode im Vergleich zu 0,0001 mbar war aber größer. Bei der Laserleistung von 1000 W betrug diese 3.17 mm und bei 1500 W waren es 3,4 mm. Die anderen Schweißnahteigenschaften sind gleich wie bei 0,0001 mbar geblieben. Die maximale erreichte Einschweißtiefe beim X5CrNi18-10 war bei einem Unterdruck von 0,1 mbar 7,188 mm bei einer Laserleistung von 1500 W. Bei dem Baustahl S355 mit demselben Unterdruck wurde bessere Ergebnisse im Bereich der Einschweißtiefe und Schweißnahtqualität beobachtet. Es wurden auch hier porenfreie Schweißnähte bzw. nur ganz kleine Poren in der Wurzel gefunden. Die Schweißnahtbreite war konstant. Die maximale Einschweißtiefe lag bei 12,9 mm bei der Laserstrahlleistung von 3000 W. Es zeigte sich, dass die Einschweißtiefe bei dem Versuch mit dem Laserleistung von 2000 W am Ende der Schweißnaht um 0,9 mm geringer war. Beim Baustahl S355 wurde

noch eine Probe mit einer kleineren Geschwindigkeit von 0,6 m/min geschweißt. Mit der Verringerung der Schweißgeschwindigkeit wurde eine größere Eindringtiefe als im Vergleich zu 1,2m/min erreicht. Die maximale Einschweißtiefe konnte um 2,5 mm gesteigert werden und betrug bei 3000 W 15,4 mm.

**Bei einem Druck von 10 mbar** wurden bei dem X5CrNi18-10 Poren im Bereich der Schweißnaht ermittelt. Ab der Leistung von 1000 W und auch bei 1500 W entstand Humping. Der Abstand einer Humping-Periode im Vergleich zu 0,0001 mbar ist größer geworden. Bei der Laserleistung von 1000 W betrug dieser 4,43 mm und bei 1500 W 3,13 mm. Die anderen Schweißnahteigenschaften waren gleich wie bei 0,0001 und 0,1 mbar geblieben. Die maximale erreichte Einschweißtiefe bei X5CrNi18-10 wurde bei dem Druck von 10 mbar mit 7,445 mm ermittelt. Es zeigte sich, dass die Einschweißtiefe mit einer Laserleistung von 1500 W am Ende der Schweißnaht um 0,9mm tiefer ist im Vergleich zu Nahtanfang. Bei dem Baustahl S355 wurden unter demselben Druck kleinere Einschweiß-tiefen im Vergleich zu X5CrNi18-10 erreicht. Die Schweißnahtqualität blieb gleich wie bei 0,0001 mbar und 0,1 mbar mit dem Baustahl. Die maximale erreichte Einschweißtiefe lag bei 5,2 mm bei 1000 W.

**Bei dem Druck von 1000 mbar** wurden die kleinsten Eindringtiefen bei dem X5CrNi18-10 erreicht. Es wurde kein Humping beobachtet. Es wurde aber Spritzer ermittelt. Die maximal erreichte Einschweißtiefe lag bei 1,148 mm bei 1000 W. Die Einschweißtiefe blieb bei keiner Schweißnaht konstant. Bei dem Baustahl S355 wurden im Vergleich zum X5CrNi18-10 gleiche Einschweißtiefen erreicht. Die maximale erreichte Einschweißtiefe lag bei 1 mm bei 1500 W. Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Laserleistung ist in der nachfolgenden Abb. 144 - 146 dargestellt.

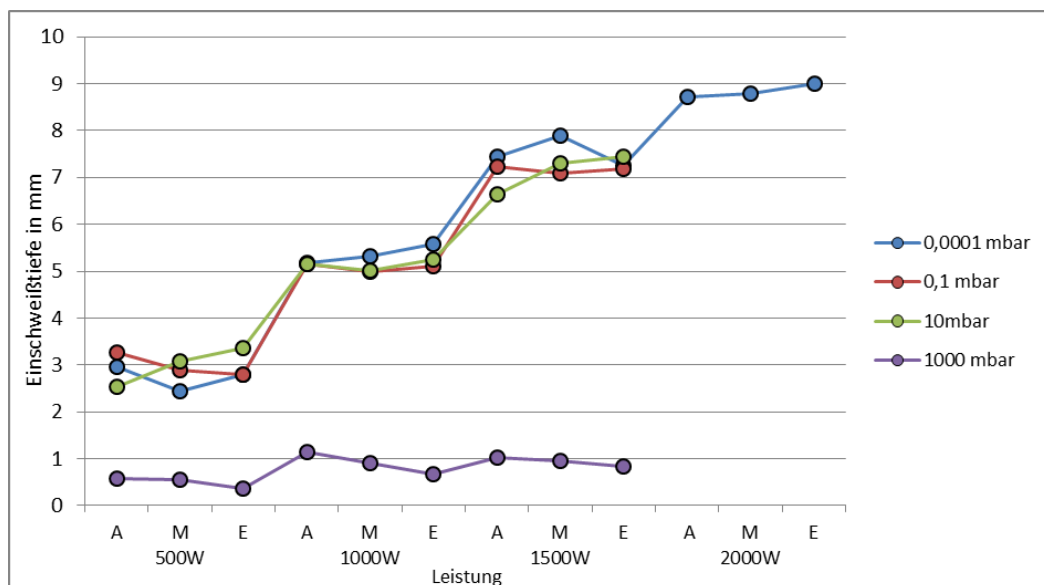


Abbildung 144: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Laserleistung bei X5CrNi18-10 (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

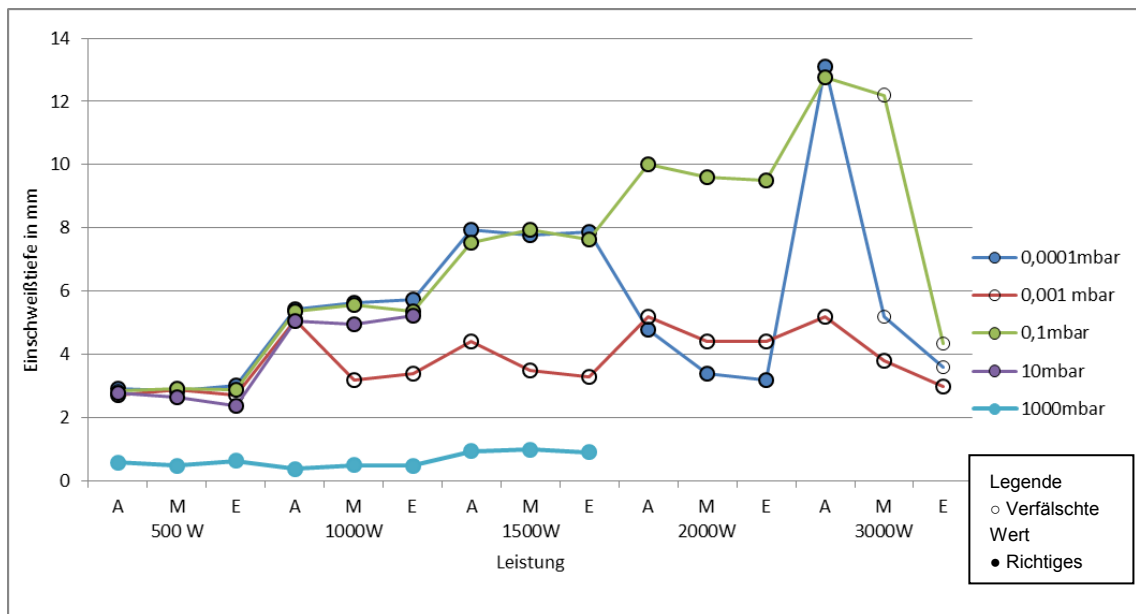


Abbildung 145: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Laserleistung bei S355 (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

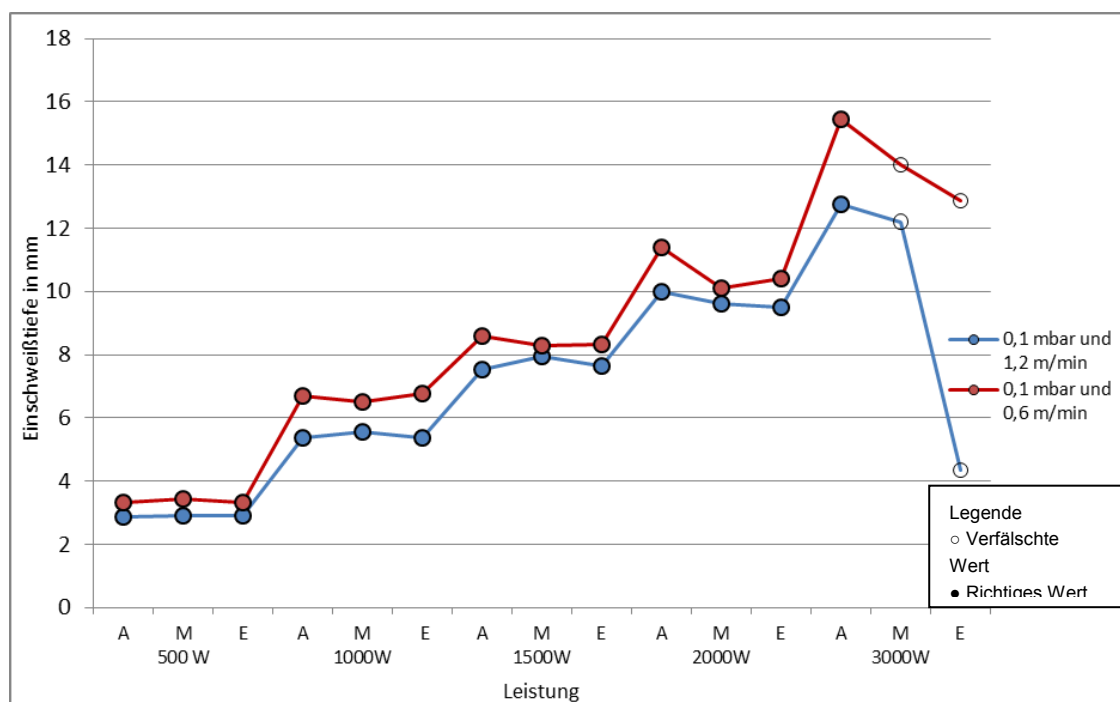


Abbildung 146: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Geschwindigkeit und Laserleistung bei S355 (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

**Bei der Defokussierung von - 3 mm** konnte beim X5CrNi18-10 festgestellt werden, dass es weniger Poren entstanden sind. Der Humping war aber immer noch vorhanden und bildet sich bei der Laserleistung von 1500 W bis 2000 W. Der Abstand einer Humping-Periode wurde größer im Vergleich zur Defokussierung 0 mm und beträgt 3,94 mm bei 1500 W und 3,73 mm bei 2000 W. Die Einschweißtiefen wurden im Vergleich zur Defokussierung von 0 mm kleiner. Die maximale erreichte Einschweißtiefe bei Defokussierung



- 3 mm beträgt 8,79 mm und wurde bei 2000 W erreicht. Beim Baustahl S355 ist die Einschweißtiefe im Vergleich zur Defokussierung 0 nur allmählich geringer geworden. Es wurde keine sichtbare Veränderungen im Bereich Schweißnahtqualität gesehen, da bei dem Baustahl S355 kein Humping entstanden ist. Die maximale erreichte Einschweißtiefe war ein wenig kleiner im Vergleich zu Defokussierung 0 und betrug 9,86 mm bei 2000 W.

**Bei einer Defokussierung von - 6 mm** trat beim X5CrNi18-10 kein Humping mehr auf. Es zeigte sich auch, dass bei der Anwendung einer Defokussierung von - 6 mm weniger Poren in der Schweißnaht auftraten. Die maximal erreichte Einschweißtiefe lag bei 7,56 mm bei 2000 W. Bei dem Baustahl S355 wurde keine deutliche Veränderung in der Schweißnahtqualität im Vergleich zur anderen Defokussierungen gesehen. Es zeigte sich, dass mit größerer Defokussierung die Einschweißtiefe sinkt. Die Einschweißtiefe über die Schweißnahtlänge war auch nicht konstant. Die maximale erreichte Einschweißtiefe lag bei 8,323 mm.

**Bei der Defokussierung von - 9 mm** wurde beim X5CrNi18-10 festgestellt, dass es noch Poren in der Schweißnaht gibt. Die maximale erreichte Einschweißtiefe wurde größer im Vergleich zur Defokussierung - 6 mm und lag bei 8,22 mm. Das Humping wurde beseitigt. Die Einschweißtiefe innerhalb der Schweißnaht blieb auch hier nicht konstant. Bei der Baustahl S355 wurde die kleinste Einschweißtiefe im Vergleich zu allen anderen Defokussierungen ermittelt. Der Schweißnahtqualität blieb gleich wie bei allen Defokussierungen. Die maximale erreichte Einschweißtiefe lag bei 6,26 mm bei 1500 W.

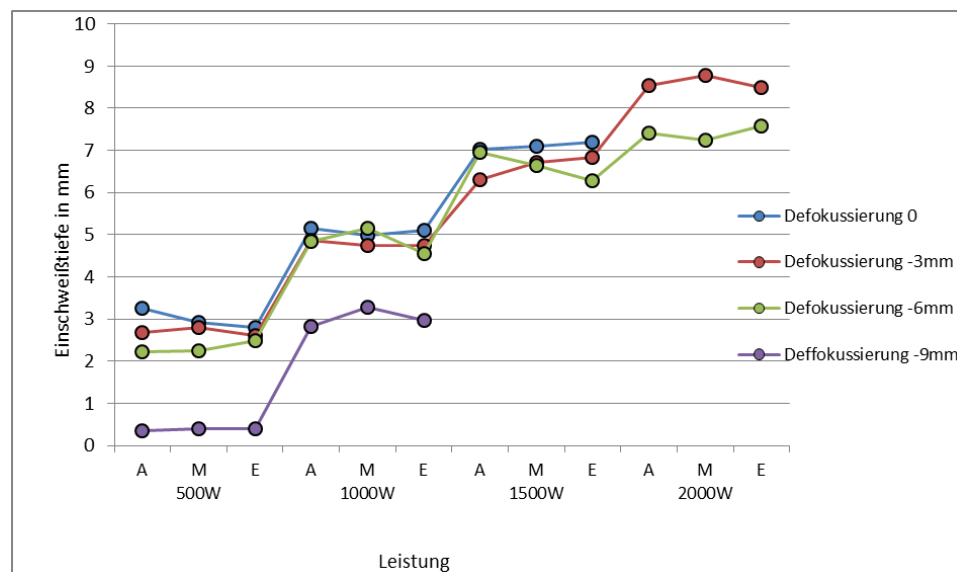


Abbildung 147: Einschweißtiefen bei X5CrNi18-10 in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung für verschiedene Defokussierungen (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

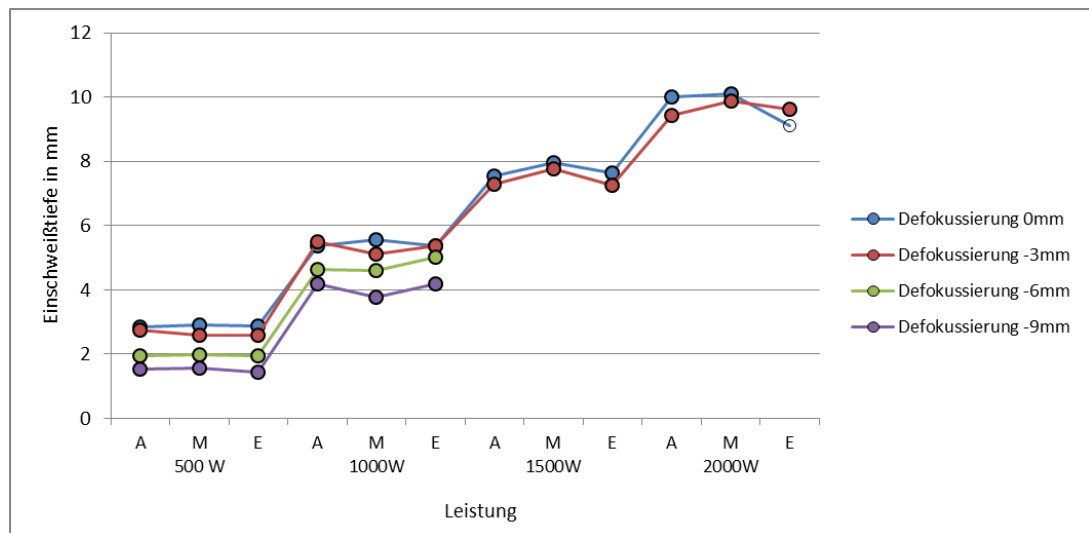


Abbildung 148: Einschweißtiefen bei S355 in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung für verschiedene Defokussierungen (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende)

Abschließend wurden alle Stähle mikroskopisch ausgewertet und in einem Diagramm Abb. 149 mit den Ergebnissen der Vorversuche vom Baustahl S355 und vom nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10 verglichen.

**Im Werkstoff 1.2842 (90MnCrV8)** konnten Poren in der Schweißnaht beobachtet werden. Außerdem wurden im Schweißgut Heißrisse bzw. Nahtmittenrisse ermittelt. Diese Heißrisse entstehen bei der Kristallisation des Werkstoffs aus der flüssigen Phase. Die maximale Einschweißtiefe war bei dem Werkstoff 90MnCrV8 bei 9,3 mm mit der Laserleistung von 2000 W. Vermutlich ging bei dem Versuch mit einer Laserleistung von 3000 W der Spiegel defekt, da die ermittelte Einschweißtiefe kleiner war als bei 2000 W.

**Bei dem Werkstoff 1.0503/C45** wurden ebenso Poren entdeckt, aber weniger als bei dem X5CrNi18-10. Außerdem wurde Humping bei den Versuchen mit den Laserleistungen von 2 kW und 3 kW ermittelt. Der Querschliff am Schweißnahtstart wurde zwei Mal poliert und geätzt. Das Ätzmittel konnte die Schweißnaht nicht anätzen, so dass keine sichtbaren Ergebnisse ermittelt werden konnten. Damit wurde diese Probe aus der Auswertung rausgenommen. Die maximale Einschweißtiefe betrug 9,9 mm bei der Laserstrahlleistung von 3000 W.

**Bei dem Werkstoff 1.2379 (X155CrVMo121)** betrug die maximale Einschweißtiefe 6,1 mm mit 1500 W. Die Ätzlösung konnte die Schweißnaht ebenfalls nicht angreifen, um Gefügebestandteile darzustellen. Auch hier ergaben sich in den Schweißversuchen, durch defekte am Umlenkspiegel, verfälschte Werte bei der Laserleistung von 2000 W und 3000 W, so dass sich die größte Einschweißtiefe bei 1500 W ergab.

**Der Werkstoff 1.2162 Einsatzstahl (21MnCr5)** zeigte eine sehr gute Nahtqualität, auf bis ein wenig Poren bei den Versuchen mit der Laserleistung von 1000 W und 3000 W. Die maximale erreichte Einschweißtiefe war 12,5 mm bei der Laserleistung 3000 W.

**Die Schweißnähte bei dem Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5)** weisen sehr gute Nahtqualität auf. Die maximale erreichte Einschweißtiefe lag bei 9,03 mm bei der Laserleistung von

2000 W. Bei dem Versuch mit der Laserleistung von 3000 W fällt die Eindringtiefe stark ab, wobei als Ursache wieder ein defekter Spiegel bei der höheren Laserstrahlleistung anzusehen ist.

**Der Werkstoff S235** zeigt eine schlechte Schweißnahtqualität. Bei jedem Versuch wurden Poren ermittelt. Außerdem ist auf der Schweißnaht Humping vorhanden. Die maximale Einschweißtiefe lag bei 9,4 mm mit der Laserleistung von 2000 W.

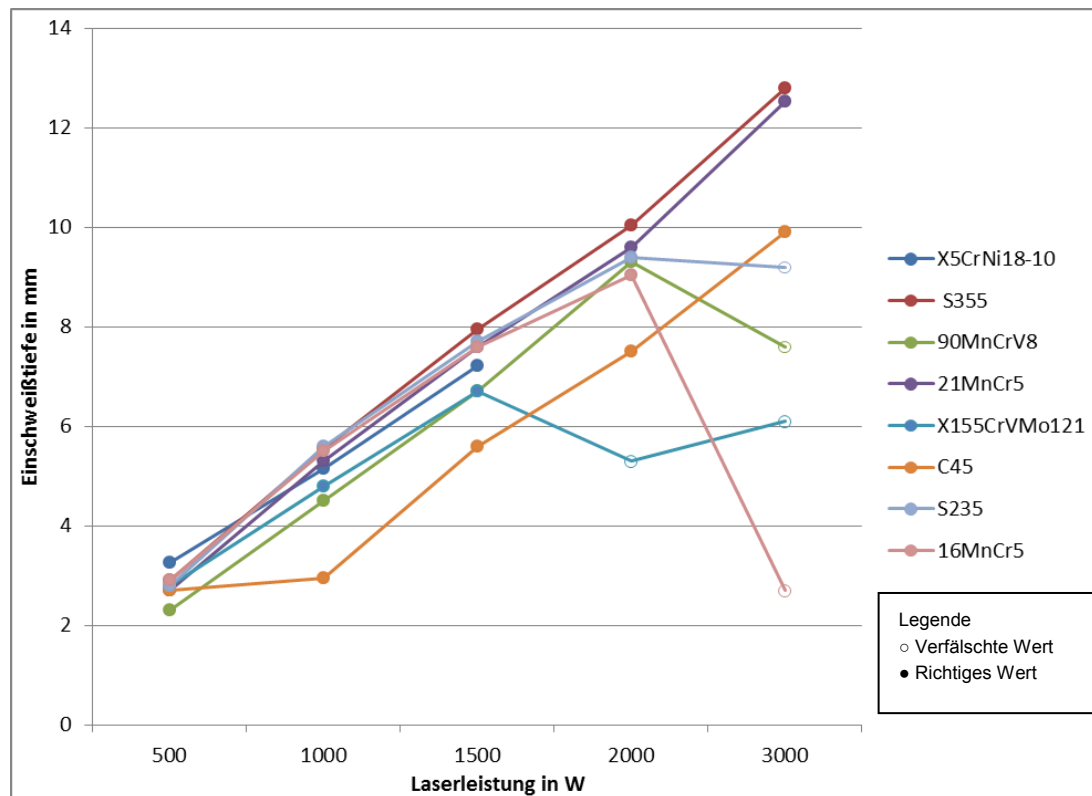
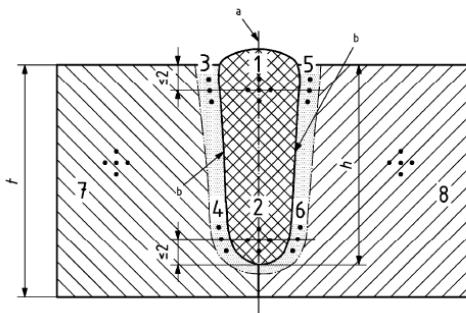


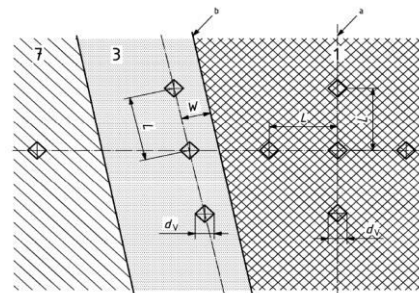
Abbildung 149: Die Vergleich erreichten Einschweißtiefen in Abhängigkeit der verwendeten Laserstrahlleistung für die verwendeten Werkstoffen

### 5.1.1 Mikrohärtemessung

Es wurden an den Schweißnähten des nichtrostenden austenitischen Stahls X5CrNi18-10 und am Baustahl S355 Mikrohärtemessungen nach Vickers durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Automatischer Härteprüfer HMV 2000 von Shimadzu. Die Härteprüfung erfolgte nach DIN ISO 22826 und mit einem HV 0,1 bzw. 0,9807 N. Für die Härtmessung wurde jeweils die Schweißnaht mit der größten Einschweißtiefe ausgewählt. Dies waren eine Probe des Baustahl S355, die mit einer Laserleistung von 2 kW und einen Unterdruck von 0,1 mbar geschweißt wurde, sowie eine Probe nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10, die mit 2 kW und einem Unterdruck von 0,0001 mbar geschweißt wurde. Es sollte jeweils ein Härtewert in der Schweißnaht, einer in der Wärmeeinflusszone (WEZ) und einer im Grundmaterial ermittelt werden. Es wurde jeweils drei Eindrücke oben und unten in der Schweißnahtzone gesetzt. Danach wurden 3 Eindrücke oben und unten, links und rechts in der Wärmeeinflusszone gemessen. Am Ende wurden noch drei Eindrücke im Grundmaterial zum Vergleich gesetzt. Für die Auswertung wurde den jeweiligen 3 Eindrücken ein Mittelwert gebildet. Alle Härtewerte sind in Tabellen 13 und 14 zusammengefasst. Die Platzierung der Eindrücke ist in der Abbildungen 151 und 152 zu sehen.



**Abbildung 150:** Lage der Eindrücke nach DIN ISO 22826



a) Vickershärte ( $d_v/2 \leq W \leq d_v$ )

**Abbildung 151:** Lage der Eindrücke im WEZ nach DIN ISO 22826

Beim **nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10** beträgt der mittlere Härtewert in der Schweißnaht oben 226,5 HV und unten 233,6 HV. Ein mittlerer Härtewert von 249 HV wurde oben links in der Wärmeeinflusszone und von 245 HV unten links ermittelt. Oben rechts in der Wärmeeinflusszone wurde ein Härtewert von 247 HV und unten rechts 254 HV ermittelt. Der mittlere Härtewert im Grundmaterial beträgt 280 HV. Damit wurde gezeigt, dass das Grundmaterial eine geringfügig höhere Härte besitzt und es in der Schweißnaht kommt nicht zu einer Aufhärtung kam, da der Härtewert in der Schweißnaht kleiner ist.

Bei dem **Baustahl S355** wurden im Vergleich zum nichtrostenden austenitischen Stahl ganz andere Härtewerte ermittelt. Die mittlere Härte in der Schweißnaht oben beträgt 420 HV und unten 459 HV, was doppelt so groß wie beim X5CrNi18-10. In der Wärmeeinflusszone oben links wurde eine Härte von 307 HV und unten links 370 HV ermittelt. Rechts von der Schweißnaht in der Wärmeeinflusszone wurde oben Härtewert von 247 HV und unten 254,6 HV ermittelt. Im Grundmaterial rechts wurde eine mittlere Härte von 221 HV und links 217 HV. Diese Analyse zeigt, dass der Schweißbereich und die Wärme-



enflusszone härter sind als das Grundmaterial. Eine Aufhärtung bedeutet Sprödbbruchneigung beim Werkstoff. Die Aufhärtung könnte durch Vorwärmen reduziert werden.

## Schlussfolgerung

Es wurde gezeigt, dass der HärteWert bei dem X5CrNi18-10 im Grundmaterial um 40 HV größer ist als im Schweißnaht. Das bedeutet, dass es nicht zu der Aufhärtung des Materials in der Schweißnaht gekommen ist. Bei dem Baustahl S355 wurde ein HärteWert im Grundmaterial von 221 HV ermittelt, was viel kleiner ist als in der Schweißnaht. In der Schweißnaht wurde ein HärteWert von 459 HV ermittelt. Das bedeutet, dass in der Schweißnaht bei dem Baustahl S355 es zu einer Aufhärtung gekommen ist.

## 5.1.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Es wurde Energiedispersive Röntgenspektroskopie, auch EDX-Verfahren genannt, bei dem nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10 angewendet, um die chemische Zusammensetzung in der Schweißnaht zu analysieren. Die Energiedispersive Röntgenspektroskopie ist eine Messmethode der Materialanalyse. Es wurde Punktuell an vier Stellen gemessen, im Grundmaterial und in der Schweißnaht neben der Pore. Es konnten keine genauen Messwerte ermittelt werden. In der Abb. 152 - 155 sind die Ergebnisse dargestellt. Es wurde gezeigt, dass die Werte ziemlich gleich bleiben.

El	OZ	Serie	unn. C [Gew.%]	norm.C [Gew.%]	Atom.C [At.%]	(1Sigma) [Gew.%]
C		6 K-Serie	8,73	8,82	28,1	1,84
O		8 K-Serie	4,61	4,66	11,15	0,98
Si		14 K-Serie	0,48	0,49	+0,66	0,05
S		16 K-Serie	0,8	0,81	0,97	0,06
Cl		17 K-Serie	0,34	0,34	0,37	0,04
Cr		24 K-Serie	15,35	15,51	11,42	0,45
Mn		25 K-Serie	1,29	1,3	0,9	0,1
Fe		26 K-Serie	59,89	60,5	41,48	1,62
Ni		28 K-Serie	7,49	7,57	4,94	0,24
Summe:			98,98	100	100	

El	OZ	Serie	unn. C [Gew.%]	norm.C [Gew.%]	Atom.C [At.%]	(1Sigma) [Gew.%]
C		6 K-Serie	8,67	8,7	28,2	1,82
O		8 K-Serie	3,94	3,95	9,61	0,88
Si		14 K-Serie	0,45	0,45	0,63	0,05
S		16 K-Serie	0,72	0,73	0,88	0,06
Cl		17 K-Serie	0,21	0,21	0,23	0,04
Cr		24 K-Serie	15,57	15,64	11,71	0,45
Mn		25 K-Serie	1,48	1,49	1,05	0,1
Fe		26 K-Serie	60,59	60,84	42,4	1,64
Ni		28 K-Serie	7,95	7,99	5,3	0,25
Summe:			98,98	100	100	

Abbildung 153: Messung 1 im Grundmaterial

El	OZ	Serie	unn. C [Gew.%]	norm.C [Gew.%]	Atom.C [At.%]	(1Sigma) [Gew.%]
C		6 K-Serie	10,06	10,06	29,81	2,11
O		8 K-Serie	7,33	7,33	16,29	1,42
Si		14 K-Serie	0,53	0,53	0,67	0,05
S		16 K-Serie	0,78	0,78	0,86	0,06
Cl		17 K-Serie	0,29	0,29	0,29	0,04
Cr		24 K-Serie	14,69	14,7	10,06	0,43
Mn		25 K-Serie	1,51	1,51	0,98	0,1
Fe		26 K-Serie	57,25	57,27	36,48	1,55
Ni		28 K-Serie	7,54	7,54	4,57	0,24
Summe:			98,98	100	100	

Abbildung 155: Messung 1 in Pore

Abbildung 152: Messung 2 im Grundmaterial

El	OZ	Serie	unn. C [Gew.%]	norm.C [Gew.%]	Atom.C [At.%]	(1Sigma) [Gew.%]
C		6 K-Serie	10,7	10,49	31,26	2,61
O		8 K-Serie	6,39	6,27	14,01	1,49
Si		14 K-Serie	0,59	0,58	0,73	0,06
S		16 K-Serie	0,84	0,83	0,92	0,06
Cl		17 K-Serie	0,4	0,39	0,39	0,05
Cr		24 K-Serie	15,36	15,06	10,36	0,46
Mn		25 K-Serie	1,33	1,31	0,85	0,13
Fe		26 K-Serie	58,55	57,41	36,78	1,6
Ni		28 K-Serie	7,83	7,67	4,68	0,27
Summe:			101,99	100	100	

Abbildung 154: Messung 2 in Pore

## 5.2 Parametervergleich

Im folgenden Kapitel findet ein Vergleich der Parameter und Ergebnisse aus der Literatur mit denen aus der vorliegenden Arbeit statt. In der Tabelle 12 sind diese dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den in der Literatur beschriebenen und den erreichte Einschweißtiefen. In einer Veröffentlichung von der RWTH Aachen – Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik wurden Laserstrahlschweißungen unter Vakuum realisiert [1]. Dazu wurde ein Baustahl S355 verwendet. Die Versuche wurden mit einem Unterdruck von 0,2 mbar durchgeführt. Es wurde mit drei Schweißgeschwindigkeiten von 0,6 m/min, 1,2 m/min und 2,4 m/min in Schweißposition PA geschweißt. Es wurde maximal mit einer Laserleistung von 5,5 kW geschweißt, was größer ist als die maximale Laserleistung des YLR Monomode Faserlasers der Firma IPG von 3 kW. Bei einer vergleichbaren Leistung von 2 kW und einer Schweißgeschwindigkeit von 1,2 m/min wurde in den am Laserinstitut der Hochschule Mittweida durchgeführten Versuchen eine Einschweißtiefe von 10,1 mm erreicht, was viel größer ist als die im Vergleich zu den Schweißergebnissen im Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen. Dort wurde bei gleichen Schweißparametern erreicht eine Einschweißtiefe von 4,9 mm erreicht. Bei einer kleineren Schweißgeschwindigkeit von 0,6 m/min und gleicher Laserleistung von 1,5 kW wurde an der RWTH Aachen eine Eindringtiefe von 5,3 mm erreicht, was kleiner ist als die am LHM erreichte Einschweißtiefe von 8,3 mm unter gleichen Bedingungen.

Einrichtung	Material	Druck	Schweißposition	Max. Leistung	Schweißgeschwindigkeit	ET bei $v_f = 0,6\text{m/min}$ und $P_L = 1,5\text{ kW}$	ET bei $v_f = 1,2\text{m/min}$ und $P_L = 2\text{ kW}$
RWTH Aachen ISF	S355	0,2 mbar	PA	5,5 kW	0,6 m/min – 2,4 m/min	5,3mm	4,9 mm
LHM Mittweida	S355	0,1 mbar	PC	3 kW	0,6 m/min – 1,2 m/min	8,6mm	10,1 mm

Tabelle 12: Parametervergleich und erreichte Einschweißtiefen

## 6 Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit stellt die Anwendung der Vakuumtechnik für das Laserstrahlschweißen dar. Der Vorteil des Einsatzes des Vakuums für die Laserstahlschweißen konnte in der vorliegenden Arbeit verdeutlicht werden. Es wurde gezeigt, dass der Unterdruck von 0,1 mbar völlig ausreicht, um diesen Effekt zu erreichen. Es wurde möglich Humping bei dem X5CrNi18-10 mit der steigenden Defokussierung zu beseitigen. Die Vorteile gegenüber der Verwendung des Laserstrahlschweißen an Atmosphäre zeigte sich deutlich in einer Steigerung der Einschweißtiefe.

Durch die Untersuchungsergebnisse der Arbeit wurde als deutlich, dass der Werkstoff S355 Baustahl wesentlich besser im Vergleich zu X5CrNi18-10 unter gleichen Bedingungen zu schweißen war. Bei dem nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10 wurden bei jedem Versuch Poren in der Schweißnaht ermittelt.

In dem durchgeführten Mikrohärtetest zeigte sich, dass es beim S355 trotz der besseren Ergebnisse im Bereich Schweißnahtqualität zu der Aufhärtung in der Schweißzone kam. Mit einer Aufhärtung kommt es zu der Spröbruchneigung und damit könnte es zu Aufhärtungsrisse kommen. Die Aufhärtungsrisse entstehen in Folge eines schnellen Abkühlens und damit verbundener Martensitbildung. Die Aufhärtung könnte durch Vorwärmen minimiert werden.

Es wurden sechs andere Werkstoffe 90MnCrV8, C45, X155CrVMo121, 21MnCr5, 16MnCr5 und S235 mit 1,2 m/min und einem Unterdruck von 0,1 mbar blindgeschweißt. Die Eindringtiefe wurde mit einem Mikroskop ermittelt und in einem Diagramm miteinander verglichen.

Es wurde weiterhin festgestellt, dass bei dem Werkstoff 1.2842 (90MnCrV8) Nahtmittenrisse auftreten.

Die größte Einschweißtiefe von 15,4 mm wurde bei der Baustahl S355 mit 0,6 m/min, bei dem Unterdruck von 0,1 mbar und der Laserleistung von 3000 W erreicht.

## 7 Ausblick

In zukünftigen Untersuchungen sollten höhere Schweißgeschwindigkeiten untersucht werden. Optimal wäre es eine andere Achse einzubauen, um die größere Schweißgeschwindigkeit zu erreichen. Zusätzlich sollten Untersuchungen zum Einfluss des Einstrahlwinkels durchgeführt werden.

Es sollte durchgedacht werden, in wie weit der Spiegel besser geschützt werden kann, bzw. der Versuchsaufbau so verändert werden kann, dass der Spiegel bei höheren Laserstrahlleistungen besser aushält.

Eine weitere Verbesserung für die Laserstrahlschweißen unter Vakuum könnte die Verringerung der Pumpenzeit erbringen, mit dem Austausch der Pumpe. Damit könnte die Produktivität verbessert werden.

Weiterhin wären Untersuchungen zur Ermittlung der Porenbildung und der Humping-Entwicklung bei dem nichtrostenden austenitischen Stahl X5CrNi18-10 interessant.

Die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse, besonders die Einschweißtiefen sollten in zukünftigen Untersuchungen auf I-Naht Schweißnähte übertragen werden.



# Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
ET	Einschweißtiefe	mm
P <sub>L</sub>	Laserstrahlleistung	W
p	Druck	Pa, bar
v <sub>f</sub>	Vorschubgeschwindigkeit (Schweißgeschwindigkeit)	m/min

## Abkürzungen

EDX - **E**nergy **D**ispersive **X**-ray Spectroscopy (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Längsschliff 2kW .....	6
Abbildung 2 -15mm Blechdicke .....	6
Abbildung 3 - 14,9mm Blechdicke .....	6
Abbildung 4 - 14,7mm Blechdicke .....	6
Abbildung 5 – 14,6mm Blechdicke .....	7
Abbildung 6 – 14,4mm Blechdicke .....	7
Abbildung 7 – 14,25mm Blechdicke .....	7
Abbildung 8 – 14,1mm Blechdicke .....	7
Abbildung 9 – 14mm Blechdicke .....	7
Abbildung 10 – 13,8mm Blechdicke .....	7
Abbildung 11: Strahlengang bis zur Vakuumkammer.....	17
Abbildung 12: Vakuumkammer - Blick in den Innenraum.....	17
Abbildung 13: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	23
Abbildung 14: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	23
Abbildung 15: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	23
Abbildung 16: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	23
Abbildung 17: Mittelwert Abstand 2,738 mm bei: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min: .....	24
Abbildung 18: Mittelwert Abstand 1,683 mm bei: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min: .....	24
Abbildung 19: Mittelwert Abstand 3,5 mm bei: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	24
Abbildung 20: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	24
Abbildung 21: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	24
Abbildung 22: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	25
Abbildung 23: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	25
Abbildung 24: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	26
Abbildung 25: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	26
Abbildung 26: Mittelwert Abstand 3,17 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	26
Abbildung 27: Mittelwert Abstand 3,4 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	26
Abbildung 28: 500 W, 0,01 mbar, 1,2 m/min .....	27
Abbildung 29: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	27
Abbildung 30: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	27
Abbildung 31: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	28
Abbildung 32: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	28
Abbildung 33 : 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	28
Abbildung 34: Mittelwert Abstand 4,43 mm, 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	28
Abbildung 35: Mittelwert Abstand 3,13 mm, 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	28
Abbildung 36: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	29
Abbildung 37: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	29
Abbildung 38: 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	29
Abbildung 39: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	30
Abbildung 40: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	30
Abbildung 41: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	30
Abbildung 42: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	30
Abbildung 43: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	30
Abbildung 44: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	31
Abbildung 45: 500 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	32
Abbildung 46: 1000 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	32
Abbildung 47: 1500 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	32
Abbildung 48: 2000 W, Def.-3 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	32
Abbildung 49: Mittelwert Abstand 3,94 mm, Def.-3mm, 1500W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	32
Abbildung 50: Mittelwert Abstand 3,73 mm,Def.-3mm, 2000W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	33
Abbildung 51: Def.-3 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	33
Abbildung 52: Def.-3 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	33
Abbildung 53: Def.-3 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	34
Abbildung 54: Def.-3 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	34
Abbildung 55: 500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	35
Abbildung 56: 1000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	35
Abbildung 57: 1500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	35
Abbildung 58: 2000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	35
Abbildung 59: Def.-6 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	36

Abbildung 60: Def.-6 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	36
Abbildung 61: Def.-6 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	36
Abbildung 62: Def.-6 mm, 2000 W, 0,1mbar, 1,2 m/min.....	37
Abbildung 63: 500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	38
Abbildung 64: 1000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	38
Abbildung 65: 1500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	38
Abbildung 66: 2000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende).....	38
Abbildung 67: Def.-9mm, 500W, 0,1mbar, 1,2m/min.....	39
Abbildung 68: Def.-9 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	39
Abbildung 69: Def.-9 mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	39
Abbildung 70: Def.-9 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	40
Abbildung 71: 500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	41
Abbildung 72: 1000 W, 0,0001mbar, 1,2 m/min .....	41
Abbildung 73: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	42
Abbildung 74: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	42
Abbildung 75: 3000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	43
Abbildung 76: 500 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min .....	44
Abbildung 77: 1000 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min .....	44
Abbildung 78: 1500 W, 0,001mbar, 1,2 m/min .....	44
Abbildung 79: 2000 W, 0,001 mbar, 1,2 m/min .....	45
Abbildung 80: 3000 W, 0,001 mbar , 1,2 m/min .....	45
Abbildung 81: 500W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	46
Abbildung 82: 1000W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	46
Abbildung 83: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	46
Abbildung 84: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	47
Abbildung 85: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	47
Abbildung 86: 500 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min .....	48
Abbildung 87: 1000 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min .....	48
Abbildung 88: 1500 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min .....	49
Abbildung 89: 2000 W, 0,1 mbar, 0,6m/min .....	49
Abbildung 90: 3000 W, 0,1 mbar, 0,6 m/min .....	50
Abbildung 91: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	51
Abbildung 92: 1000 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	51
Abbildung 93: 1500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	52
Abbildung 94: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	53
Abbildung 95: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	53
Abbildung 96: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min (v.l.n.r.: Start-Mitte-Ende) .....	53
Abbildung 97: 500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	53
Abbildung 98: 1000 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	54
Abbildung 99: 1500 W, 1000 mbar, 1,2 m/min .....	54
Abbildung 100: Def.-3 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	55
Abbildung 101: Def.-3 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	55
Abbildung 102: Def.-3 mm, 1500W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	56
Abbildung 103: Def.-3 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	56
Abbildung 104: Def.-6 mm, 500 W 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	57
Abbildung 105: Def.-6 mm, 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	57
Abbildung 106: Def.-6mm, 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	58
Abbildung 107: Def.-6 mm, 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	58
Abbildung 108: Def.-9 mm, 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	59
Abbildung 109: Def.-9 mm 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	59
Abbildung 110: Def.-9 mm, 1500 W 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	60
Abbildung 111: Def.-9 mm 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min.....	60
Abbildung 112: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	61
Abbildung 113: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	61
Abbildung 114: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2m/min .....	62
Abbildung 115: 2000W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	62
Abbildung 116: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	63
Abbildung 117: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	64
Abbildung 118: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	64
Abbildung 119: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	64
Abbildung 120: 2000 W. 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	64
Abbildung 121: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	65
Abbildung 122: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	66
Abbildung 123: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	66
Abbildung 124: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	66
Abbildung 125: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	67
Abbildung 126: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	67
Abbildung 127: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	68

Abbildung 128: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	68
Abbildung 129: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	68
Abbildung 130: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2m/min .....	69
Abbildung 131: 3000, 0,1 mbar, 1,2m/min.....	69
Abbildung 132: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	70
Abbildung 133: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	70
Abbildung 134: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	70
Abbildung 135: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	71
Abbildung 136: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	71
Abbildung 137: 500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	72
Abbildung 138: 1000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	72
Abbildung 139: 1500 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	72
Abbildung 140: 2000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	73
Abbildung 141: 3000 W, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	73
Abbildung 142: Defekte Spiegel von der höheren Leistungen.....	74
Abbildung 143: Schweißergebnisse beim Baustahl S355 .....	75
Abbildung 144: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Laserleistung bei X5CrNi18-10.....	76
Abbildung 145: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Laserleistung bei S355.....	77
Abbildung 146: Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Geschwindigkeit und Laserleistung bei S355 ..	77
Abbildung 147: Einschweißtiefen bei X5CrNi18-10 in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung für verschiedene Defokussierungen (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende).....	78
Abbildung 148: Einschweißtiefen bei S355 in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung für verschiedene Defokussierungen (A - Anfang, M - Mitte, E - Ende) .....	79
Abbildung 149: Die Vergleich erreichten Einschweißtiefen in Abhängigkeit der verwendeten Laserstrahlleistung für die verwendeten Werkstoffen.....	80
Abbildung 152: Lage der Eindrücke nach DIN ISO 22826 .....	81
Abbildung 151: Lage der Eindrücke im WEZ nach DIN ISO 22826.....	81
Abbildung 153: Messung 2 im Grundmaterial .....	82
Abbildung 154: Messung 1 im Grundmaterial .....	82
Abbildung 155: Messung 2 in Pore.....	82
Abbildung 156: Messung 1 in Pore.....	82
Abbildung 157: Start.....	VIII
Abbildung 158: Mitte.....	VIII
Abbildung 159: Ende .....	VIII
Abbildung 160: Start.....	VIII
Abbildung 161: Mitte.....	VIII
Abbildung 162: Ende .....	VIII
Abbildung 163: Start.....	VIII
Abbildung 164: Mitte.....	VIII
Abbildung 165: Ende .....	VIII
Abbildung 166: Start.....	IX
Abbildung 167: Mitte.....	IX
Abbildung 168: Ende .....	IX
Abbildung 169: Start.....	IX
Abbildung 170: Mitte.....	IX
Abbildung 171: Ende .....	IX
Abbildung 172: Start.....	IX
Abbildung 173: Mitte.....	IX
Abbildung 174: Ende .....	IX
Abbildung 175: Start.....	IX
Abbildung 176: Mitte.....	IX
Abbildung 177: Ende .....	IX
Abbildung 178: Start.....	IX
Abbildung 179: Mitte.....	IX
Abbildung 180: Ende .....	IX
Abbildung 181: Start.....	X
Abbildung 182: Mitte.....	X
Abbildung 183: Ende .....	X
Abbildung 184: Start.....	X
Abbildung 185: Mitte.....	X
Abbildung 186: Ende .....	X
Abbildung 187: Start.....	X
Abbildung 188: Mitte.....	X
Abbildung 189: Ende .....	X
Abbildung 190: Start.....	X
Abbildung 191: Mitte.....	X
Abbildung 192: Ende .....	X
Abbildung 193: Start.....	X



Abbildung 194: Mitte.....	X
Abbildung 195: Ende.....	X
Abbildung 196: Start.....	XI
Abbildung 197: Mitte.....	XI
Abbildung 198: Ende.....	XI
Abbildung 199: Start.....	XI
Abbildung 200: Mitte.....	XI
Abbildung 201: Ende.....	XI
Abbildung 202: Start.....	XI
Abbildung 203: Mitte.....	XI
Abbildung 204: Ende.....	XI
Abbildung 205: Start.....	XII
Abbildung 206: Mitte.....	XII
Abbildung 207: Ende.....	XII
Abbildung 208: Start.....	XII
Abbildung 209: Mitte.....	XII
Abbildung 210: Ende.....	XII
Abbildung 211: Start.....	XII
Abbildung 212: Mitte.....	XII
Abbildung 213: Ende.....	XII
Abbildung 214: Start.....	XII
Abbildung 215: Mitte.....	XII
Abbildung 216: Ende.....	XII
Abbildung 217: Start.....	XIII
Abbildung 218: Mitte.....	XIII
Abbildung 219: Ende.....	XIII
Abbildung 220: Start.....	XIII
Abbildung 221: Mitte.....	XIII
Abbildung 222: Ende.....	XIII
Abbildung 223: Start.....	XIII
Abbildung 224: Mitte.....	XIII
Abbildung 225: Ende.....	XIII
Abbildung 226: Start.....	XIII
Abbildung 227: Mitte.....	XIII
Abbildung 228: Ende.....	XIII
Abbildung 229: Start.....	XIV
Abbildung 230: Mitte.....	XIV
Abbildung 231: Ende.....	XIV
Abbildung 232: Start.....	XIV
Abbildung 233: Mitte.....	XIV
Abbildung 234: Ende.....	XIV
Abbildung 235: Start.....	XIV
Abbildung 236: Mitte.....	XIV
Abbildung 237: Ende.....	XIV
Abbildung 238: Start.....	XIV
Abbildung 239: Mitte.....	XIV
Abbildung 240: Ende.....	XIV

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Bearbeitungsparameter .....	16
Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von Nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10	18
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Unlegierter Baustahl S355 .....	18
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von unlegierter Vergütungsstahl C45 .....	18
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von Kaltarbeitswerkzeugstahl X155CrVMo121 .....	18
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung von Einsatzstahl 21MnCr5 .....	18
Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung von 90MnCrV8 .....	18
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung von Einsatzstahl 16MnCr5 .....	18
Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung von S235 .....	18
Tabelle 10: Nachgemessene chemische Zusammensetzung .....	19
Tabelle 11: Herstellerangaben zum Lasergerät Modell YLR 3000-SM .....	20
Tabelle 12: Parametervergleich und erreichte Einschweißiefen .....	83
Tabelle 13: Härtewerte bei der Edelstahl .....	V
Tabelle 14: Härtewerte bei der Baustahl .....	VII
Tabelle 15: Lage der Eindrücke nach DIN ISO 22826 .....	VII
Tabelle 16: 500W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	VIII
Tabelle 17: 500W, 0,0001mbar, 1,2m/min .....	VIII
Tabelle 18: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	VIII
Tabelle 19: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min .....	IX
Tabelle 20: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2m/min .....	IX
Tabelle 21: 500W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	IX
Tabelle 22: 1000W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	IX
Tabelle 23: 1500W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	IX
Tabelle 24: 2000W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	X
Tabelle 25: 3000 W, 0,1mbar, 1,2m/min .....	X
Tabelle 26: 500W, 0,1mbar, 0,6m/min .....	X
Tabelle 27: 1000W, 0,1mbar, 0,6m/min .....	X
Tabelle 28: 1500W, 0,1mbar, 0,6m/min .....	X
Tabelle 29: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min .....	XI
Tabelle 30: 1000W, 10mbar, 1,2m/min .....	XI
Tabelle 31: 1500W, 10mbar, 1,2m/min .....	XI
Tabelle 32: 500W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min .....	XII
Tabelle 33: 1000W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min .....	XII
Tabelle 34: 1500W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min .....	XII
Tabelle 35: 2000W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min .....	XII
Tabelle 36: 500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIII
Tabelle 37: 1000W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIII
Tabelle 38: 1500W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIII
Tabelle 39: 2000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIII
Tabelle 40: 500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIV
Tabelle 41: 1000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIV
Tabelle 42: 1500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min .....	XIV
Tabelle 43: 2000 W, Def.-9 mm, 0,1mbar, 1,2 m/min .....	XIV

# Literatur

- [1] Uwe Reisgen, Simon Olschok, Stefan Jakobs,  
RWTH Aachen – Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik  
Laserstrahlschweißen unter Vakuum  
Journal Photonik 3/2014: S 54-55
- [3] Yang, S. L., and Kovacevic, R. 2009  
Laser welding of galvanized DP980 steel assisted  
by the GTAW preheating in a gap-free lap  
joint configuration. Journal of Laser Application  
21(3): 139–148.
- [4] Yang, S. L., Carlson, B. E., and Kovacevic,  
R. 2011. Laser welding of high-strength galvanized  
steels in a gap-free lap joint  
configuration under different shielding conditions.  
Welding Journal 90(1): 8-s to 18-s.
- [5] Kim, C. H., Ahn, Y. N., and Kim, J. H.  
2011. CO2 laser-micro plasma arc hybrid welding  
for galvanized steel sheets. Transactions of  
Nonferrous Metals Society of China 21: 47/s–53/s.
- [6] Mazumder, J., and Steen, W. 2011. Heat  
transfer model for cw laser material processing.  
Journal of Applied Physics 211: 668–674.
- [7] Beck, M., Berger, P., and Hugel, H. 1995.  
The effect of plasma formation on beam focusing  
in deep penetration welding CO2 lasers.  
Journal of Physics D: Applied Physics 28:  
2430–2442.
- [8] Yang, S. L., and Kovacevic, R. 2009.  
Laser welding of galvanized DP980 steel assisted  
by the GTAW preheating in a gap-free lap  
joint configuration. Journal of Laser Application  
21(3): 139–148.
- [9] Yang, S. L., Carlson, B. E., and Kovacevic,  
R. 2011. Laser welding of high-strength galvanized  
steels in a gap-free lap joint  
configuration under different shielding conditions.  
Welding Journal 90(1): 8-s to 18-s.
- [10] S. YANG, J. WANG, B. E. CARLSON, AND J. ZHANG  
Vacuum-Assisted Laser Welding of Zinc-Coated Steels in a Gap-Free Lap Joint Configuration  
THE WELDING JOURNAL, JULY 2013 S197-204
- [11] U. Reisgen et al.: Laser beam welding in vacuum  
of thick plate structural steel. Proceedings  
of 32th ICALEO 2013, 341-360, paper  
1304
- [12] Uwe Reisgen, Simon Olschok, Stefan Jakobs and Michael Mücke  
Welding with the Laser Beam in Vacuum  
Close-to-production test series for the vehicle industry  
Laser Technik Journal 2/2015 S 42-46
- [13] TRUMPF, Tiefschweißen unter:  
[http://www.de.trumpf.com/de/produkte/lasertechnik/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/tiefschweissen.h  
tml](http://www.de.trumpf.com/de/produkte/lasertechnik/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/tiefschweissen.html)

Seiji Katayamaa\*, Abe Yoheia, Masami Mizutania, Yousuke Kawahitoa

- [14] Development of Deep Penetration Welding Technology  
with High Brightness Laser under Vacuum  
Joining and Welding Research Institute(JWRI), Osaka University, Osaka, Japan  
S 75-80
- [15] Michael Runzka , Linde AG – Geschäftsbereich Linde Gas, Hamburg  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Lasertechnik – ein Überblick  
[http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/IWS/PDF/Fuegetechnik/Lasertechnik\\_Grundlagen\\_\\_\\_\\_Schweissen.pdf](http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/IWS/PDF/Fuegetechnik/Lasertechnik_Grundlagen____Schweissen.pdf)
- [16] Dipl.-Ing. Bernhard Holzinger  
TU Wien  
LU 345.003 Lasertechnik Laserschweißen  
<http://info.tuwien.ac.at/ift/labor/schweissuebung.pdf>
- Dr.-Ing. S. Olschok, Dipl.-Ing. S. Jakobs  
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, ISF
- [17] Laserstrahlschweißen unter Vakuum:  
Eine Alternative zum Schweißen von Dickblechen  
<https://www.isf.rwth-aachen.de/fileadmin/docs/isfdir/isfdirekt44.pdf>
- [18] Dietmar Lober  
[www.metallograf.de](http://www.metallograf.de)  
Letzte Aktualisierung : 02.05.2015  
<http://www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro17.htm>





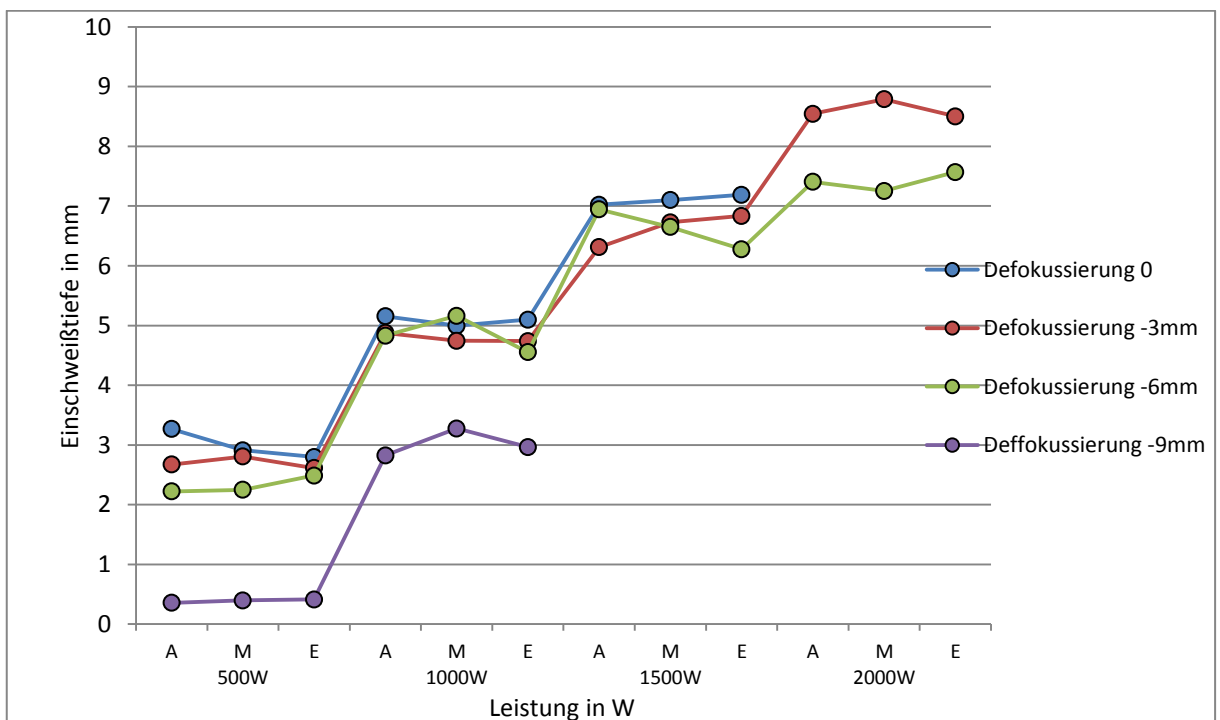
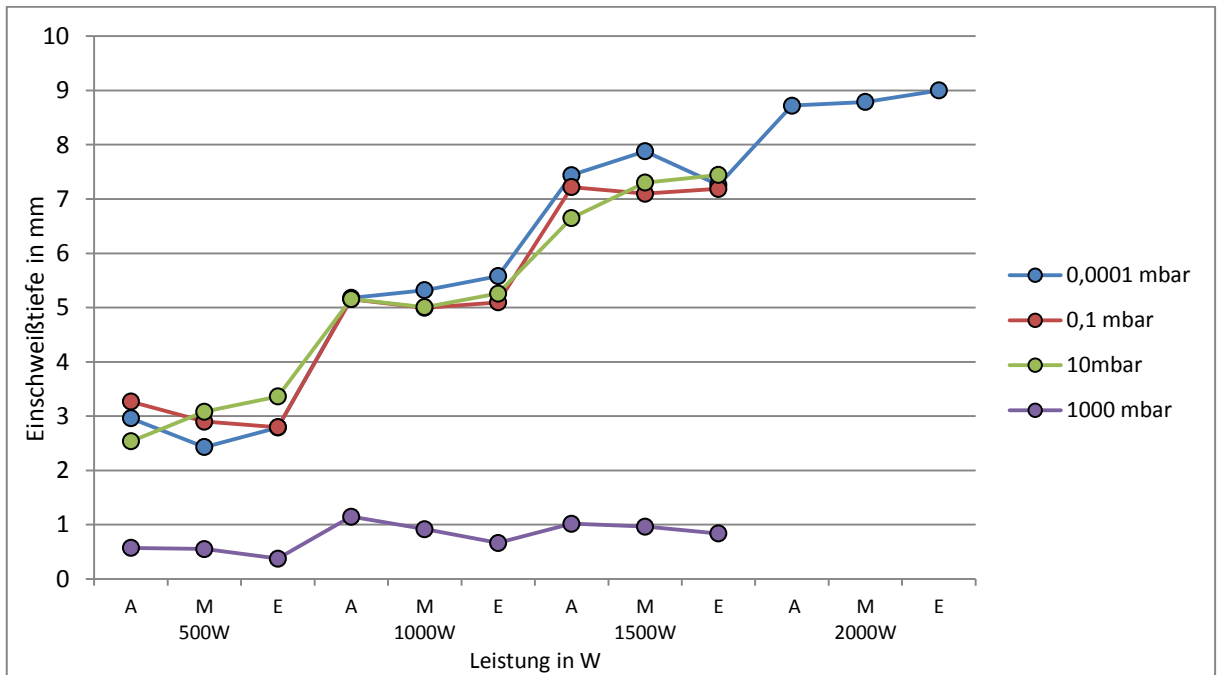
# Anlagen

Teil 1 .....	A-I
Teil 2 .....	A-III
Teil 3 .....	A-V



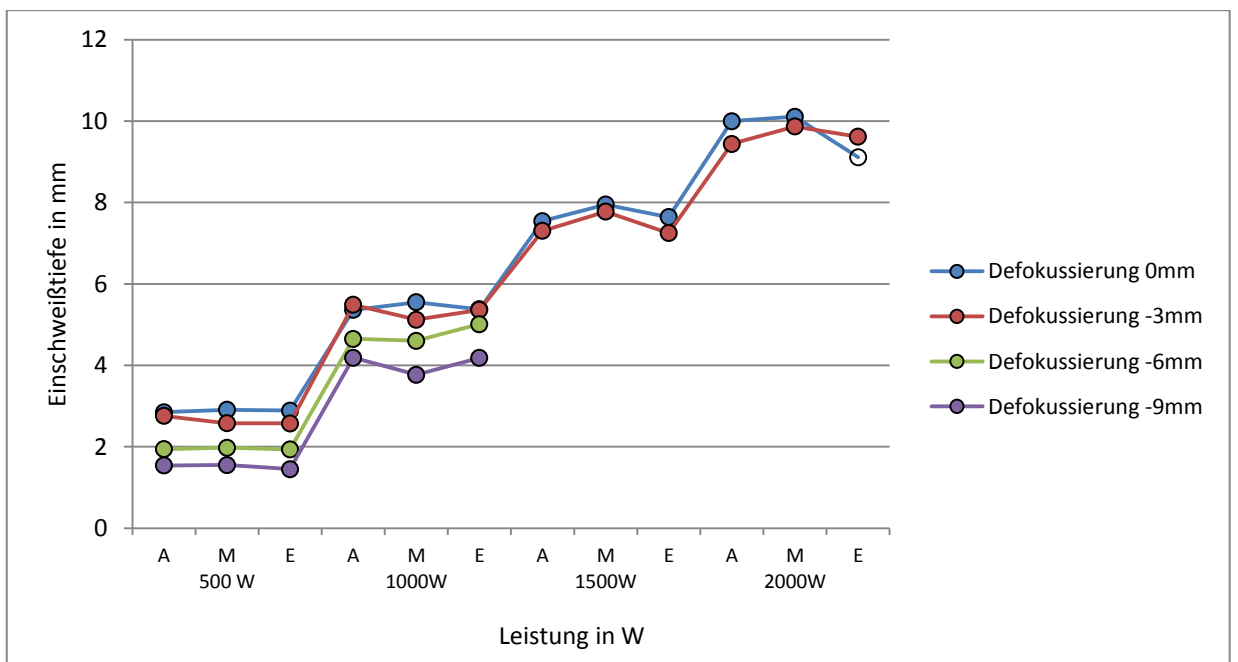
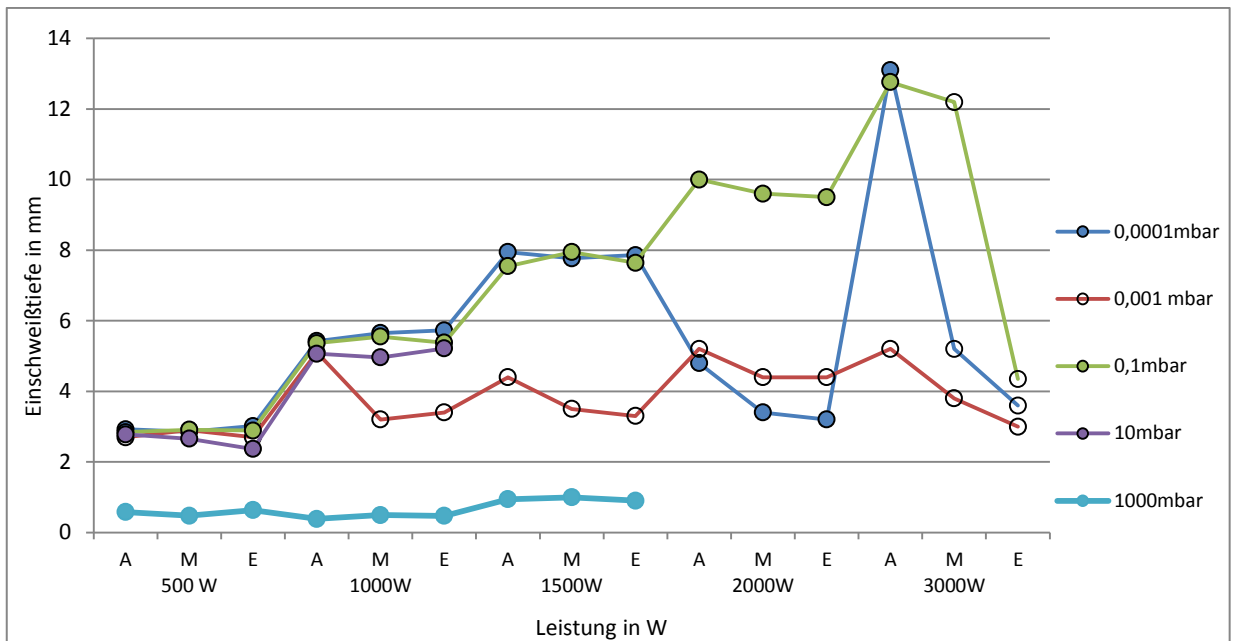
# Anlagen, Diagramme

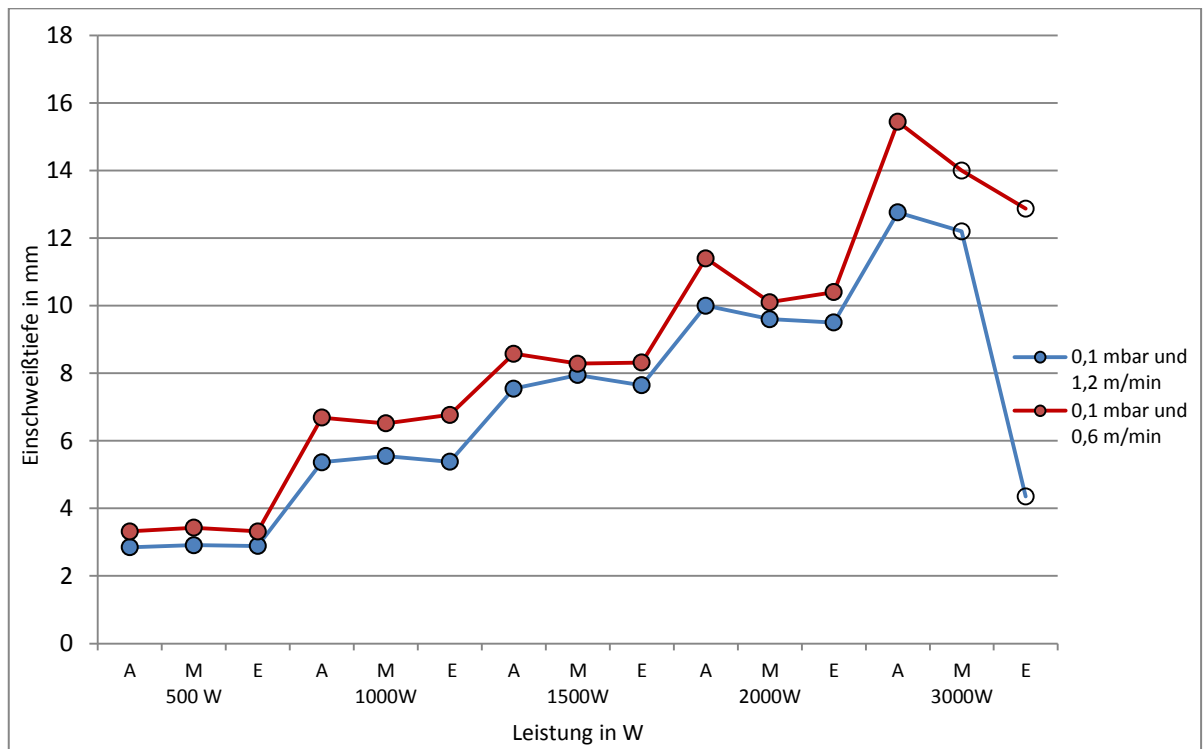
## Edelstahl 1.4301 (X5CrNi18-10)

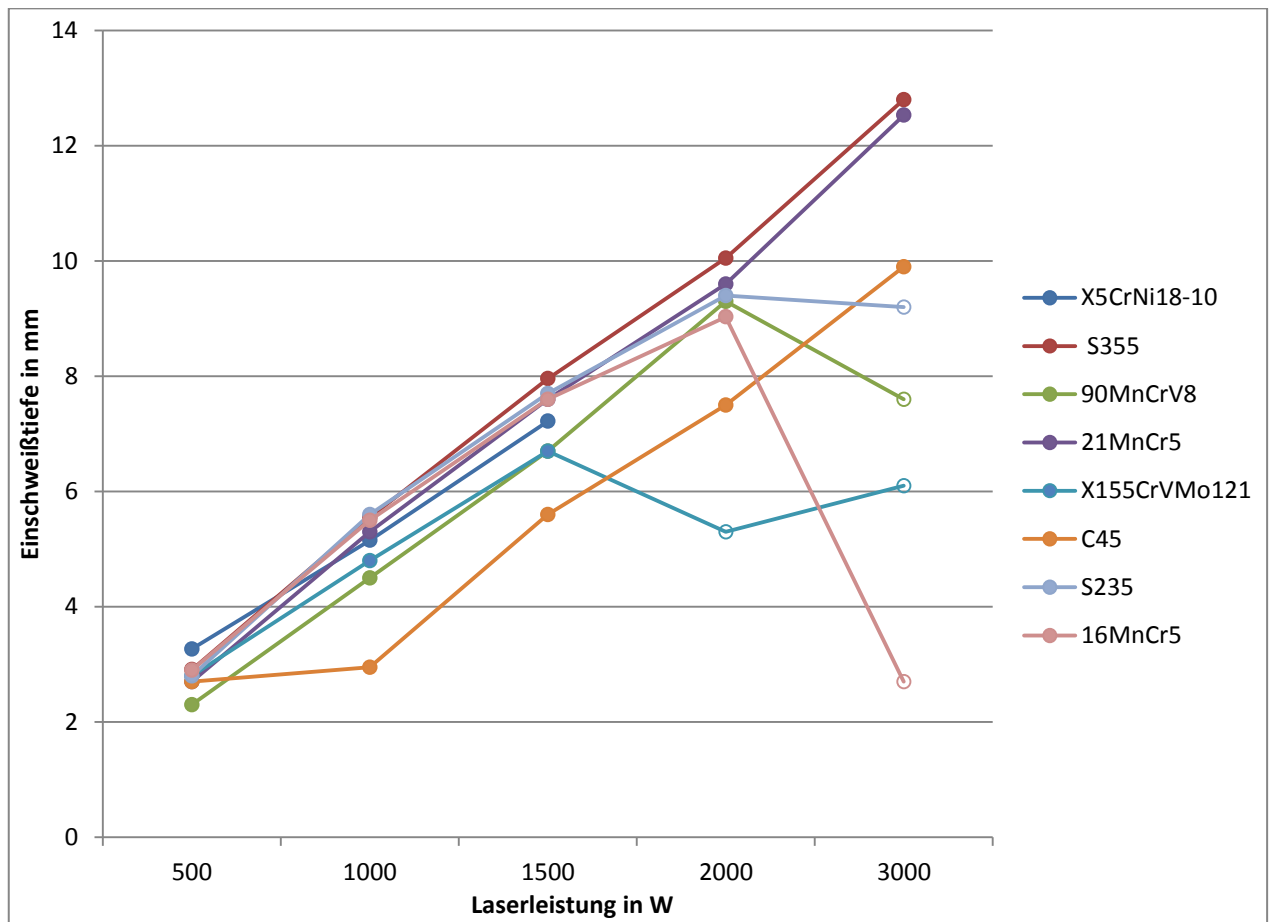




## Baustahl S355







## Anlagen, Härtemessung

Härtemessung nichtrostender austenitischer Stahl X5CrNi18-10 2kW  
0,0001mbar

226,0 HV 1	2Pkt. von oben SN
231,4 HV 1	3Pkt. von oben SN
222,0 HV 1	1Pkt. von oben SN
246,0 HV 1	1Pkt. von unten SN
233,0 HV 1	3Pkt. von unten SN
220,9 HV 1	2Pkt. von unten SN
242,0 HV 1	WEZ 1Pkt von oben links
257,0 HV 1	WEZ 2Pkt von oben links
236,8 HV 1	WEZ 1Pkt von unten links
249,1 HV 1	WEZ 3Pkt von oben links
254,0 HV 1	WEZ 2Pkt. von unten links
244,9 HV 1	WEZ 3Pkt von unten links
235,7 HV 1	WEZ 1Pkt von oben rechts
237,4 HV 1	WEZ 2Pkt von oben rechts
269,5 HV 1	WEZ 3Pkt von oben rechts
251,5 HV 1	WEZ 1Pkt von unten rechts
254,6 HV 1	WEZ 2Pkt von unten rechts
259,0 HV 1	WEZ 3Pkt von unten rechts
282,9 HV 1	Grundmaterial 1Pkt links
268,8 HV 1	Grundmaterial 2Pkt links
282,2 HV 1	Grundmaterial 3Pkt links
288,8 HV 1	Grundmaterial 1Pkt rechts
280,0 HV 1	Grundmaterial 2Pkt rechts
276,5 HV 1	Grundmaterial 3Pkt rechts
Tabelle 13 : Härtewerte bei der Edelstahl	

SN – Schweißnaht

WEZ – Wärmeeinflusszone





## Härtemessung Baustahl S355 2kW 0,1mbar

413,6 HV 1	1Pkt von oben SN
424,1 HV 1	2Pkt von oben SN
424,1 HV 1	3Pkt von oben SN
464,3 HV 1	1Pkt von unten SN
458,2 HV 1	2Pkt von unten SN
455,1 HV 1	3Pkt von unten SN
298,9 HV 1	WEZ 1Pkt von oben links
320,7 HV 1	WEZ 2Pkt von oben links
305,3 HV 1	WEZ 3Pkt von oben links
375,1 HV 1	WEZ 1Pkt von unten links
372,9 HV 1	WEZ 2Pkt von unten links
364,2 HV 1	WEZ 3Pkt von unten links
309,5 HV 1	WEZ 1Pkt von oben rechts
290,7 HV 1	WEZ 2Pkt von oben rechts
307,8 HV 1	WEZ 3Pkt von oben rechts
346,8 HV 1	WEZ 1Pkt von unten rechts
416,1 HV 1	WEZ 2Pkt von unten rechts
416,1 HV 1	WEZ 3Pkt von unten rechts
224,5 HV 1	Grundmaterial 1Pkt rechts
222,4 HV 1	Grundmaterial 2Pkt rechts
218,4 HV 1	Grundmaterial 3Pkt rechts
218,0 HV 1	Grundmaterial 1Pkt links
220,4 HV 1	Grundmaterial 2Pkt links
212,8 HV 1	Grundmaterial 3Pkt links
Tabelle 14 : Härtewerte bei der Baustahl	

SN – Schweißnaht

WEZ – Wärmeeinflusszone

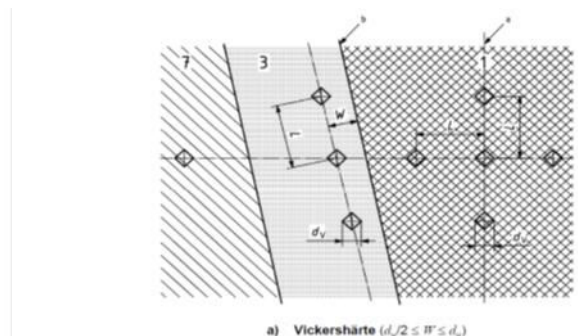
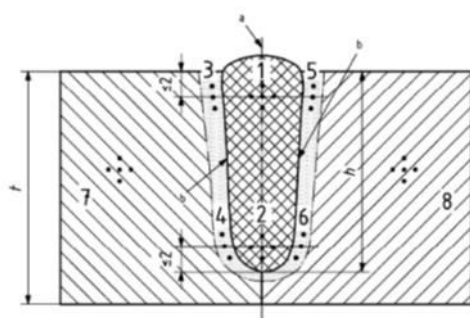


Tabelle 15: Lage der Eindrücke nach DIN ISO 22826

## Anlagen, Bilder

### Edelstahl 0,1mbar

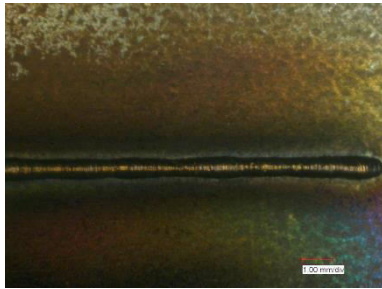


Abbildung 156: Start

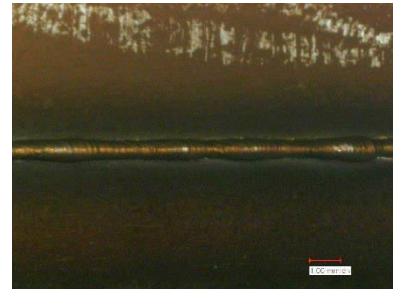
Abbildung 157: Mitte  
Tabelle 16: 500W, 0,1mbar, 1,2m/min

Abbildung 158: Ende

### Baustahl 0,0001mbar

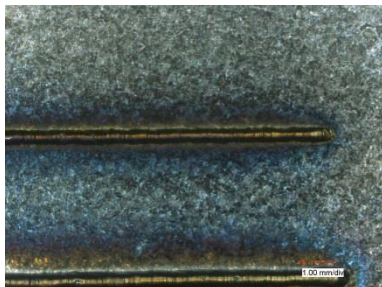


Abbildung 159: Start

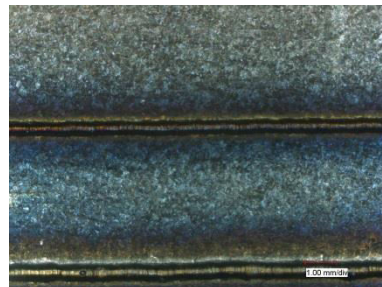
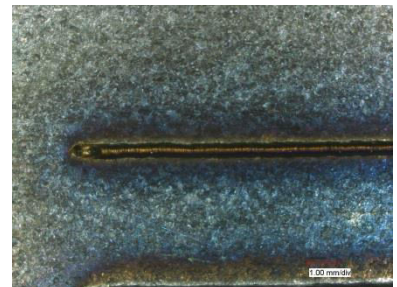
Abbildung 160: Mitte  
Tabelle 17: 500W, 0,0001mbar, 1,2m/min

Abbildung 161: Ende



Abbildung 162: Start

Abbildung 163: Mitte  
Tabelle 18: 1000 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min

Abbildung 164: Ende





Abbildung 165: Start

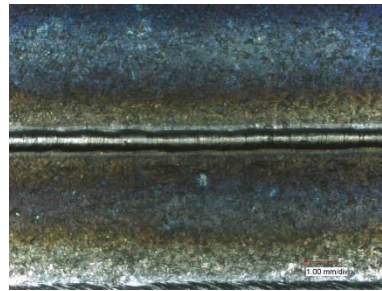


Abbildung 166: Mitte



Abbildung 167: Ende

Tabelle 19: 1500 W, 0,0001 mbar, 1,2 m/min

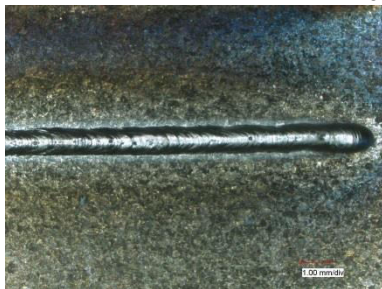


Abbildung 168: Start

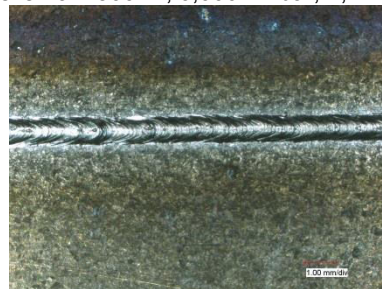


Abbildung 169: Mitte

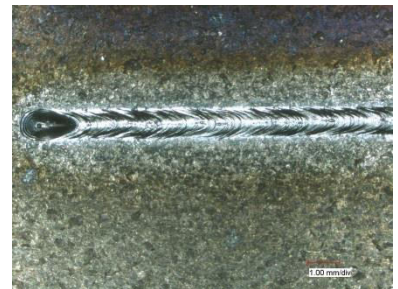


Abbildung 170: Ende

Tabelle 20: 2000 W, 0,0001 mbar, 1,2m/min

0,1 mbar



Abbildung 171: Start



Abbildung 172: Mitte



Abbildung 173: Ende

Tabelle 21: 500W, 0,1mbar, 1,2m/min

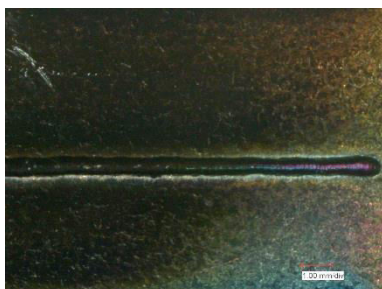


Abbildung 174: Start



Abbildung 175: Mitte

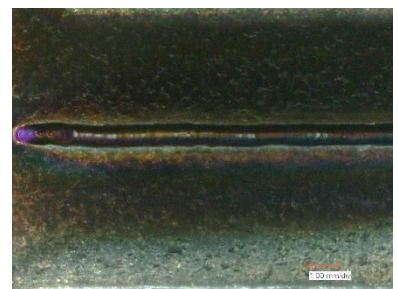


Abbildung 176: Ende

Tabelle 22: 1000W, 0,1mbar, 1,2m/min

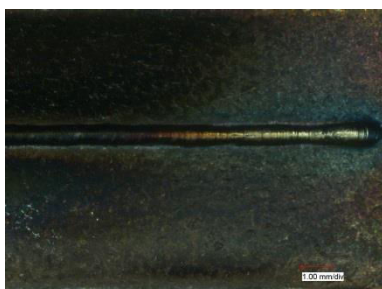


Abbildung 177: Start

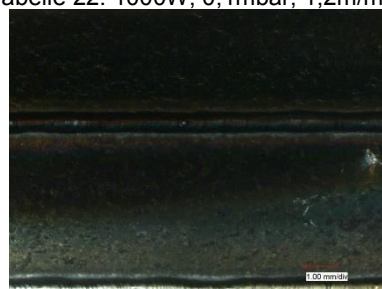


Abbildung 178: Mitte

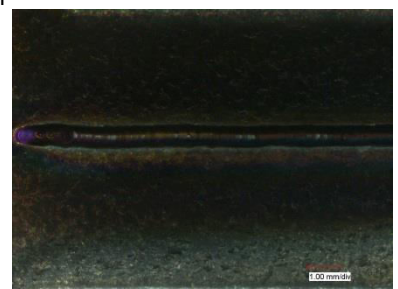


Abbildung 179: Ende

Tabelle 23: 1500W, 0,1mbar, 1,2m/min





Abbildung 180: Start

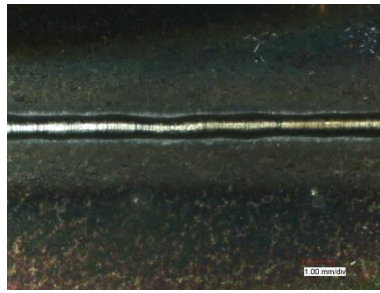


Abbildung 181: Mitte

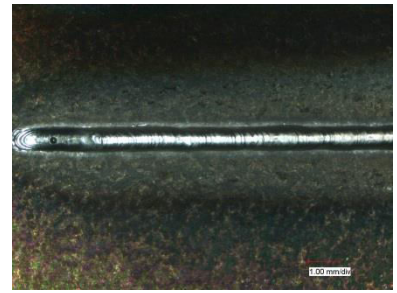


Abbildung 182: Ende

Tabelle 24: 2000W, 0,1mbar, 1,2m/min



Abbildung 183: Start

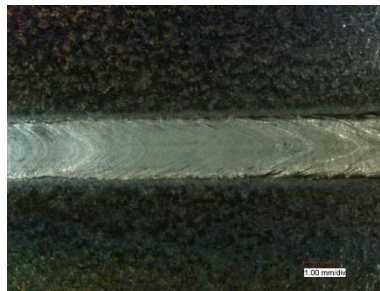


Abbildung 184: Mitte

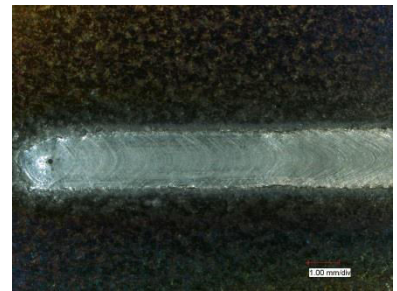


Abbildung 185: Ende

Tabelle 25: 3000 W, 0,1mbar, 1,2m/min

0,1mbar 0,6m/min

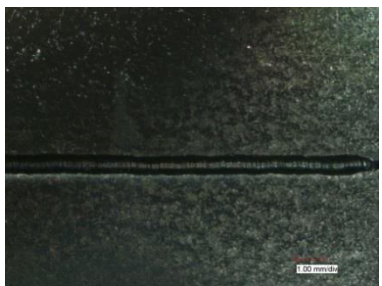


Abbildung 186: Start



Abbildung 187: Mitte

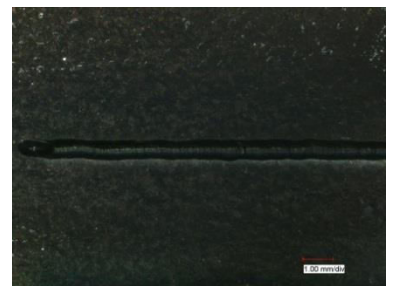


Abbildung 188: Ende

Tabelle 26: 500W, 0,1mbar, 0,6m/min

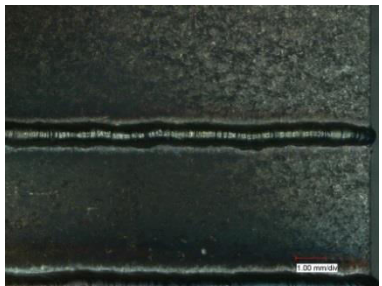


Abbildung 189: Start

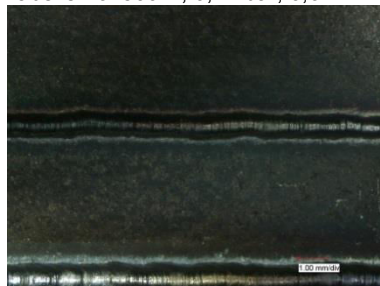


Abbildung 190: Mitte

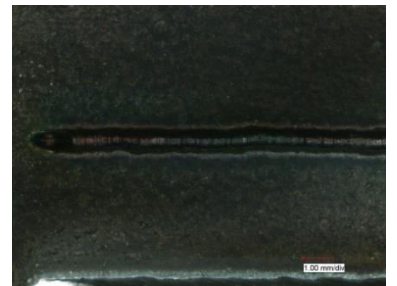


Abbildung 191: Ende

Tabelle 27: 1000W, 0,1mbar, 0,6m/min

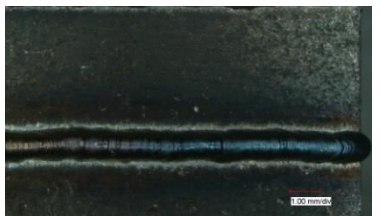


Abbildung 192: Start

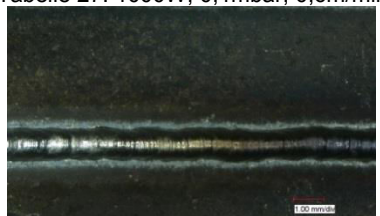


Abbildung 193: Mitte



Abbildung 194: Ende

Tabelle 28: 1500W, 0,1mbar, 0,6m/min

10 mbar

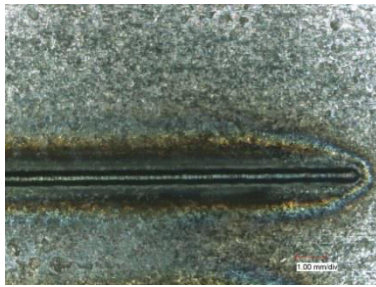


Abbildung 195: Start

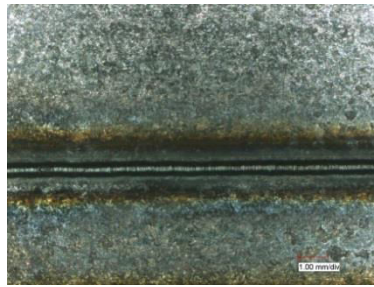
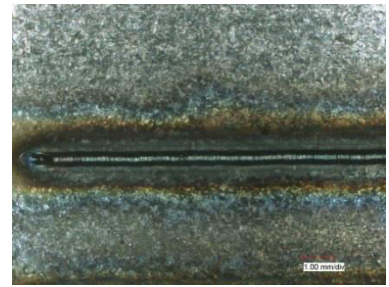
Abbildung 196: Mitte  
Tabelle 29: 500 W, 10 mbar, 1,2 m/min

Abbildung 197: Ende

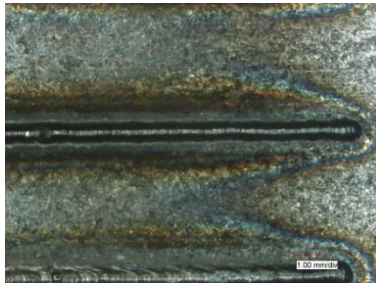


Abbildung 198: Start

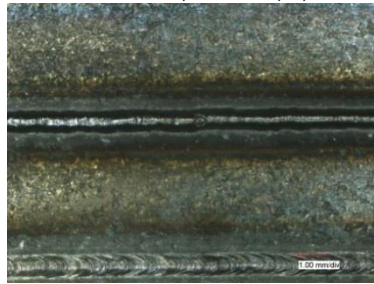
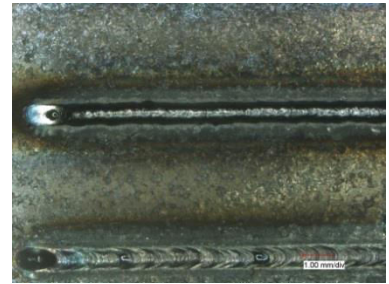
Abbildung 199: Mitte  
Tabelle 30: 1000W, 10mbar, 1,2m/min

Abbildung 200: Ende



Abbildung 201: Start

Abbildung 202: Mitte  
Tabelle 31: 1500W, 10mbar, 1,2m/min

Abbildung 203: Ende



## Defokussierung -3mm

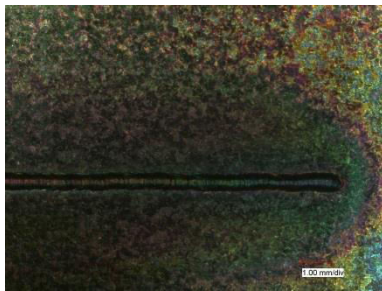


Abbildung 204: Start



Abbildung 205: Mitte

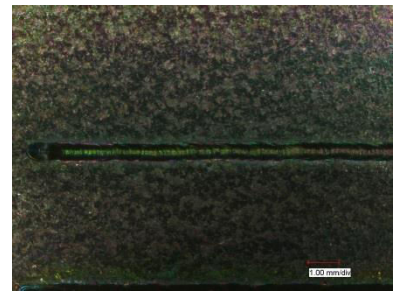


Abbildung 206: Ende

Tabelle 32: 500W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min



Abbildung 207: Start



Abbildung 208: Mitte

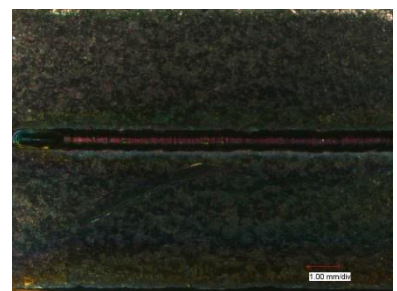


Abbildung 209: Ende

Tabelle 33: 1000W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min



Abbildung 210: Start

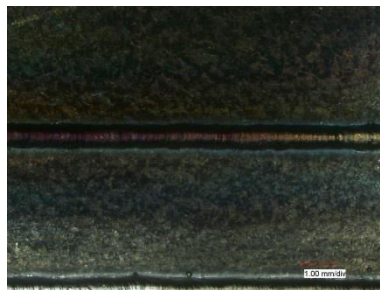


Abbildung 211: Mitte

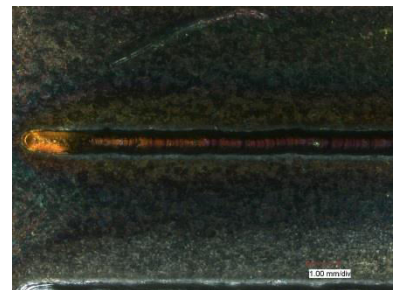


Abbildung 212: Ende

Tabelle 34: 500W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min



Abbildung 213: Start



Abbildung 214: Mitte

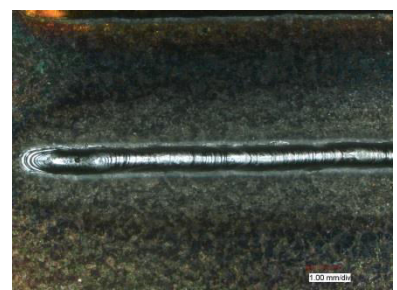


Abbildung 215: Ende

Tabelle 35: 2000W, Def.-3mm, 0,1mbar, 1,2m/min

## Defokussierung – 6 mm

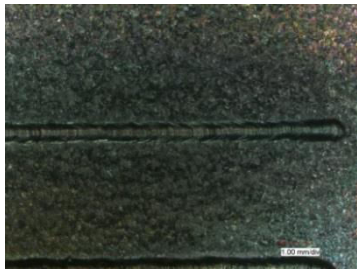


Abbildung 216: Start

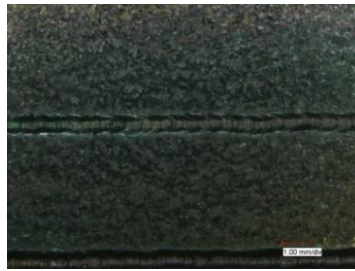


Abbildung 217: Mitte

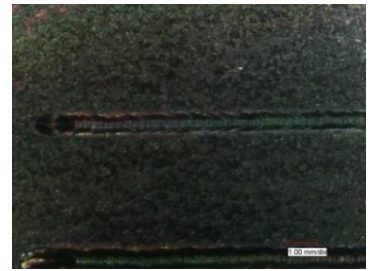


Abbildung 218: Ende

Tabelle 36: 500 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Abbildung 219: Start

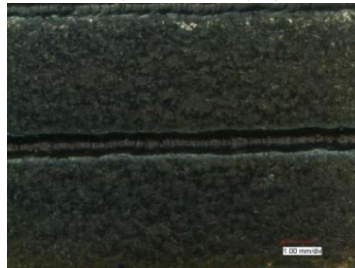


Abbildung 220: Mitte

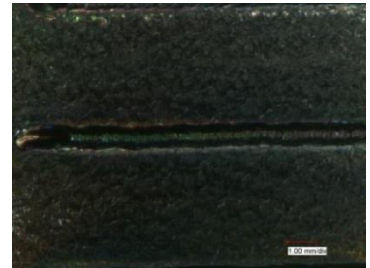


Abbildung 221: Ende

Tabelle 37: 1000W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min

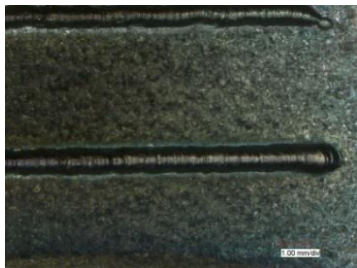


Abbildung 222: Start

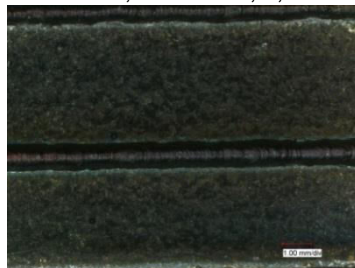


Abbildung 223: Mitte



Abbildung 224: Ende

Tabelle 38: 1500W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min



Abbildung 225: Start

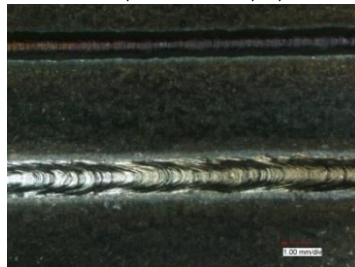


Abbildung 226: Mitte

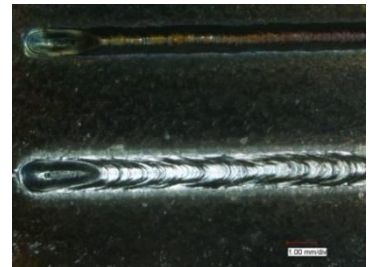


Abbildung 227: Ende

Tabelle 39: 2000 W, Def.-6 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min



## Defokussierung – 9 mm

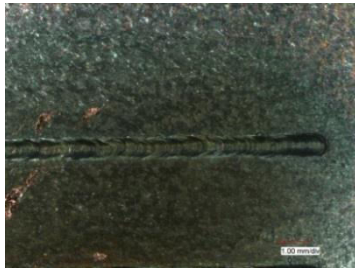


Abbildung 228: Start

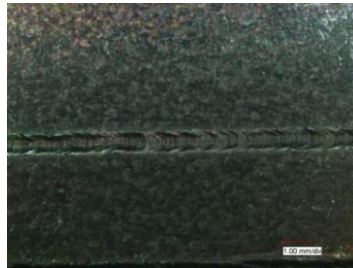


Abbildung 229: Mitte

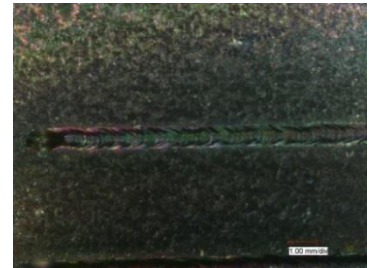


Abbildung 230: Ende

Tabelle 40: 500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min

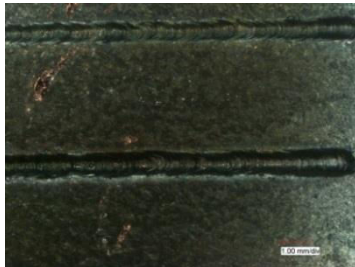


Abbildung 231: Start

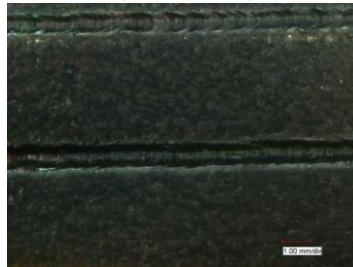


Abbildung 232: Mitte

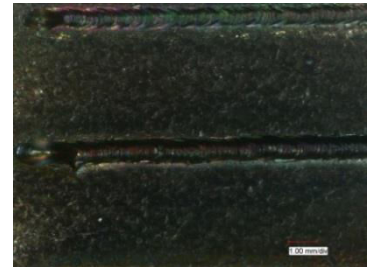


Abbildung 233: Ende

Tabelle 41: 1000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min

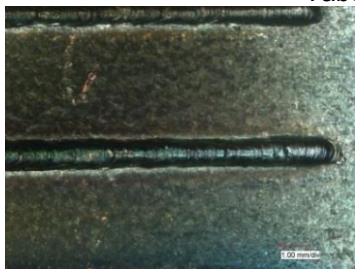


Abbildung 234: Start

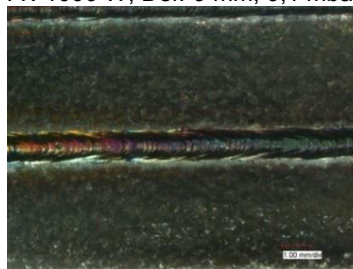


Abbildung 235: Mitte

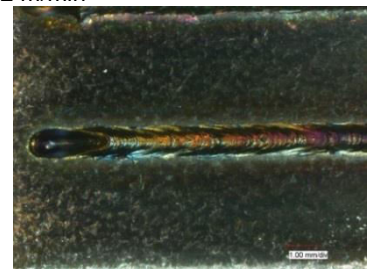


Abbildung 236: Ende

Tabelle 42: 1500 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min

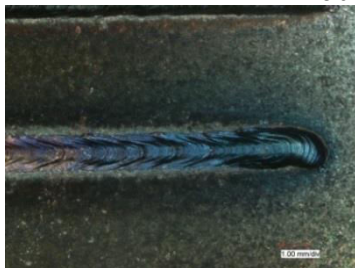


Abbildung 237: Start

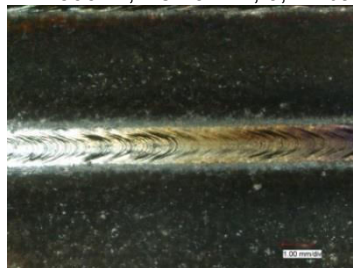


Abbildung 238: Mitte

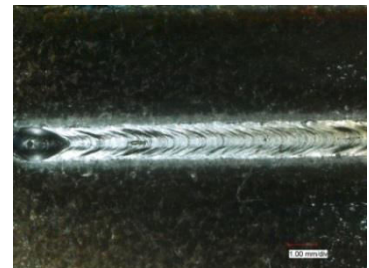


Abbildung 239: Ende

Tabelle 43: 2000 W, Def.-9 mm, 0,1 mbar, 1,2 m/min

## Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner für die Zulassung zum Thema und seine jederzeit freundlich gewährte Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Jan Drechsel für sein interessantes und spannendes Thema und engagierte Betreuung, die großzügig gewährte Hilfsbereitschaft und die Einführung in das Gebiet der Laserstrahlschweißen im Vakuum. Ohne seine vorbildliche Einsatzbereitschaft hätten einige Ziele dieser Arbeit nicht erreicht werden können.

Für meine Bachelorarbeit schulde ich sehr vielen Menschen herzlichen Dank.

Für das Gelingen meiner Bachelorarbeit danke ich auch einen Kollegen die maßgeblich beteiligt waren, namentlich:

Dipl.-Ing. (FH) Lars Hartwig

Dipl.-Ing. Andreas Eysert

Dipl.-Ing.(FH) Andreas Gruner

Dipl.-Ing. Jan Bachale

Alexander Thurm

Dipl.-Ing.(FH) Maren Nieher

Dipl.-Ing.(FH) Matthias Horn

Sie standen mir mit Rat und Tat zur Seite und sorgten stets für eine gute Arbeitsatmosphäre.

Ebenso möchte ich mich noch bei meinen Eltern und Freunden bedanken für deren Unterstützung in jeglicher Hinsicht während meiner Bachelorarbeit.

Mittweida, Oktober 2015





## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 26.10.2015

Daniel Bolz